



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AMBIENTE, TECNOLOGIA E SOCIEDADE

KAIO VINÍCCIUS ZACARIAS NUNES

**OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE FILMES A BASE DE ALGINATO DE
SÓDIO ADITIVADOS COM CERA DE ABELHA E ÓLEO ESSENCIAL DE
BAMBURRAL (*Hyptis suaveolens* L.) E SUA APLICAÇÃO COMO REVESTIMENTO
NA CONSERVAÇÃO DE BANANA (*Musa* sp.)**

MOSSORÓ

2025

KAIO VINÍCCIUS ZACARIAS NUNES

**OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE FILMES A BASE DE ALGINATO DE
SÓDIO ADITIVADOS COM CERA DE ABELHA E ÓLEO ESSENCIAL DE
BAMBURRAL (*Hyptis suaveolens* L.) E SUA APLICAÇÃO COMO REVESTIMENTO
NA CONSERVAÇÃO DE BANANA (*Musa* sp.)**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ambiente, Tecnologia e Sociedade da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Linha de Pesquisa: Tecnologias Sustentáveis e Recursos Naturais do Semi-Árido.

Orientador: Ricardo Henrique de Lima Leite, Prof. Dr.

Coorientadores:
Edna Maria Mendes Aroucha, Prof. Dra.
Claudio Costa dos Santos, Prof. Dr.

MOSSORÓ

2025

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

Z9720 Zacarias Nunes, Kaio Viníccius.
Obtenção e caracterização de filmes a base de alginato de sódio aditivados com cera de abelha e óleo essencial de bamburral (*Hyptis suaveolens* L.) e sua aplicação como revestimento na conservação de banana (*Musa* sp.) / Kaio Viníccius Zacarias Nunes.
- 2025.
85 f. : il.

Orientador: Ricardo Henrique de Lima Leite.
Coorientadora: Edna Maria Mendes Aroucha.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em Ambiente, Tecnologia e Sociedade, 2025.

1. Bioplástico. 2. Biopolímeros. 3. Hidrocoloide. 4. Pós-colheita. 5. Revestimentos.
I. Leite, Ricardo Henrique de Lima, orient. II. Aroucha, Edna Maria Mendes, co-orient. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência
Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva
CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

KAIO VINÍCCIUS ZACARIAS NUNES

**OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE FILMES A BASE DE ALGINATO DE
SÓDIO ADITIVADOS COM CERA DE ABELHA E ÓLEO ESSENCIAL DE
BAMBURRAL (*Hyptis suaveolens* L.) E SUA APLICAÇÃO COMO REVESTIMENTO
NA CONSERVAÇÃO DE BANANA (*Musa* sp.)**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ambiente, Tecnologia e Sociedade da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Linha de Pesquisa: Tecnologias Sustentáveis e Recursos Naturais do Semiárido

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ricardo Henrique de Lima Leite.
Presidente (UFERSA)



Documento assinado digitalmente
RICARDO HENRIQUE DE LIMA LEITE
Data: 11/03/2025 20:58:24-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Francisco Klebson Gomes dos Santos
Membro Examinador Interno a Instituição (UFERSA)



Documento assinado digitalmente
FRANCISCO KLEBSON GOMES DOS SANTOS
Data: 11/03/2025 14:48:09-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Alcivan Almeida Evangelista Neto
Membro Examinador Externo a Instituição (IFRN)



Documento assinado digitalmente
ALCIVAN ALMEIDA EVANGELISTA NETO
Data: 11/03/2025 20:13:52-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

OBTENÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE FILMES A BASE DE ALGINATO DE SÓDIO ADITIVADOS COM CERA DE ABELHA E ÓLEO ESSENCIAL DE BAMBURRAL (*Hyptis suaveolens* L.) E SUA APLICAÇÃO COMO REVESTIMENTO NA CONSERVAÇÃO DE BANANA (*Musa* sp.)

RESUMO

A crescente preocupação com os impactos ambientais ocasionados pelos plásticos convencionais tem incentivado o desenvolvimento de plásticos biodegradáveis e/ou oriundos de fontes renováveis. O presente estudo investiga a elaboração de filmes biopoliméricos a base de alginato de sódio, cera de abelha e óleo essencial de baurburral, com o objetivo de obter melhorias em suas propriedades ópticas, mecânicas, de barreira e antifúngicas que possibilitem o seu uso como embalagens na preservação de bananas. Com esse propósito, o estudo ocorreu em duas etapas: a primeira com a produção de uma solução filmogênica desenvolvida por meio de um planejamento fatorial 2² com três repetições no ponto central (alginato de sódio 85%; óleo essencial de baurburral 10% com alginato de sódio 75%; óleo essencial de baurburral 10% com cera de abelha 30% e alginato de sódio 47%; cera de abelha 30% com alginato 57% e óleo essencial de baurburral 5% com cera de abelha 15% e alginato 66%). Na segunda etapa ocorreu a aplicação por imersão dos revestimentos e o acondicionamento de bananas ‘Prata’ armazenadas sob refrigeração a 15±2 °C e 60±2% UR (0, 5, 10, 15 e 20 dias) e em temperaturas usadas durante a comercialização para avaliação de *shelf life* a 23±2 °C e 60±2% UR (0+3, 5+3, 10+3, 15+3 e 20+3 dias). A pesquisa revelou que a combinação de alginato de sódio, cera de abelha e óleo essencial de baurburral no filme influencia significativamente as propriedades dos filmes biopoliméricos, tornando-os mais espessos, menos solúveis e com maior resistência à permeabilidade de água. A adição de cera de abelha afetou as propriedades ópticas, mecânicas e de barreira, enquanto o óleo essencial contribuiu para maior flexibilidade e plasticidade dos filmes. As bananas sem revestimento ou revestidas apenas com alginato de sódio se mantiveram com qualidade até o dia 15+3, enquanto os demais tratamentos foram até o dia 20+3, prolongando a vida útil dos frutos por 5 dias, especialmente o tratamento com óleo essencial de baurburral a 10% e alginato de sódio. Além disso, o óleo essencial de *Hyptis suaveolens* demonstrou atividade antifúngica, evidenciando seu potencial no controle de fitopatógenos.

Palavras-chave: biopolímeros, revestimentos, bioplástico, hidrocolóide, pós-colheita.

**OBTAINING AND CHARACTERIZATION OF FILMS BASED ON SODIUM
ALGINATE ADDITIVED WITH BEESWAX AND BAMBURRAL ESSENTIAL OIL
(*Hyptis suaveolens* L.) AND THEIR APPLICATION AS A COATING IN THE
CONSERVATION OF BANANA (*Musa* sp.)**

ABSTRACT

The growing concern about the environmental impacts caused by conventional plastics has encouraged the development of biodegradable plastics and/or plastics from renewable sources. This study investigates the development of biopolymeric films based on sodium alginate, beeswax and bamburral essential oil, with the aim of obtaining improvements in their optical, mechanical, barrier and antifungal properties that allow their use as packaging for the preservation of bananas. For this purpose, the study took place in two stages: the first with the production of a film-forming solution developed through a 2² factorial design with three repetitions at the central point (sodium alginate 85%; bamburral essential oil 10% with sodium alginate 75%; bamburral essential oil 10% with beeswax 30% and sodium alginate 47%; beeswax 30% with alginate 57% and bamburral essential oil 5% with beeswax 15% and alginate 66%). In the second stage, the coatings were applied by immersion and the 'Prata' bananas were stored under refrigeration at 15±2 °C and 60±2% RH (0, 5, 10, 15 and 20 days) and at temperatures used during commercialization for shelf-life evaluation at 23±2 °C and 60±2% RH (0+3, 5+3, 10+3, 15+3 and 20+3 days). The research revealed that the combination of sodium alginate, beeswax and bamburral essential oil in the film significantly influences the properties of the biopolymer films, making them thicker, less soluble and with greater resistance to water permeability. The addition of beeswax affected the optical, mechanical and barrier properties, while the essential oil contributed to greater flexibility and plasticity of the films. Bananas without coating or coated only with sodium alginate maintained their quality until day 15+3, while the other treatments lasted until day 20+3, extending the shelf life of the fruits by 5 days, especially the treatment with bamburral essential oil at 10% and sodium alginate. In addition, the essential oil of *Hyptis suaveolens* demonstrated antifungal activity, evidencing its potential in the control of phytopathogens.

Key words: biopolymers, coatings, bioplastic, hydrocolloid, post-harvest.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estrutura molecular do alginato de sódio.....	18
Figura 2. Exemplos de compostos presentes em óleos essenciais.....	21
Figura 3. Estruturas químicas do glicerol, sorbitol e ácido cítrico.....	23
Figura 4. Estágios de maturação de Von Loesecke, de acordo com o grau de cor da casca: completamente verde (1); verde com traços amarelos (2); mais verde que amarelo (3); mais amarelo que verde (4); amarelo com pontas verdes (5); completamente amarelo (6); amarelo com manchas marrons (7).....	27
Figura 5. Planejamento fatorial 2^2 com ponto central para solução filmogênica desenvolvida.....	31
Figura 6. Método de <i>casting</i> para formação de filme.....	33
Figura 7. Cromatograma dos óleos essenciais das folhas de <i>Hyptis suaveolens</i>	43
Figura 8. Espectro de massa do 1,8-cienol encontrado no OEHSFF.....	43
Figura 9. Espectro de massa do Sabineno encontrado no OEHSFF.....	43
Figura 10. Micrografias das superfícies e das seções transversais dos filmes: ALG85 (a). OEB10/ALG75 (b). OEB10/CA30/ALG47 (c). CA30/ALG57 (d). e OEB5/CA15/ALG66 (e). Magnitude = 2000x, tensão de aceleração = 20 kV, distância das lentes = 8,11 a 12,49 mm, tipo de sinal = elétrons secundários.....	49
Figura 11. Taxa de respiração para bananas cv. prata até 20 dias de armazenamento.....	52
Figura 12. Perda de massa (%) para bananas cv. prata até 20 dias de armazenamento sob refrigeração de 15 °C.....	54
Figura 13. Firmeza (N) para bananas cv. prata até 20+3 dias de armazenamento em temperatura ambiente de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ (shelf life).....	56
Figura 14. A cor da casca da banana cv. prata.....	58
Figura 15. Acidez titulável das polpas de bananas revestidas com alginato de sódio, cera de abelha e óleo essencial de baurburral em função do tempo de armazenamento.....	60
Figura 16. Sólidos solúveis das polpas de bananas revestidas com alginato de sódio, cera de abelha e óleo essencial de baurburral em função do tempo de armazenamento.....	62
Figura 17. Amido das polpas de bananas revestidas com alginato de sódio, cera de abelha e óleo essencial de baurburral em função do tempo de armazenamento.....	64
Figura 18. Visão do anverso da placa de petri representando cada tratamento.....	65
Figura 19. Visão do reverso da placa de petri representando cada tratamento.....	65
Figura 20. Análise sensorial de bananas armazenadas durante 23 dias sob condições	

refrigeradas (15 °C), utilizando uma escala hedônica (a) Aceitação de compra; (b) Ocorrência de Fungos; (c) Adesividade do filme; e temperatura ambiente (23 °C), utilizando uma escala hedônica (d) Aceitação de compra; (e) Presença de Fungos; (f) Adesividade do filme.....67

Figura 21. Ilustração da aparência externa da banana prata, acondicionado com diferentes revestimentos a $15 \pm 2^{\circ}\text{C}$ por 20 dias e $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ por 23 dias.....68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Classificação científica da planta Bamburral.....	20
Tabela 2. Delineamento experimental - planejamento fatorial 2^2 com adição de um ponto central.....	32
Tabela 3. Composições dos filmes de alginato de sódio, cera de abelha e óleo essencial de bamburral a serem desenvolvidos no estudo.....	32
Tabela 4. Composição química dos óleos voláteis extraídos das folhas de <i>Hyptis suaveolens</i> coletados no parque Fuma Feia (OEHSFF) com os IK corrigido.....	44
Tabela 5. Espessura, TPVA, PVA e solubilidade dos filmes de alginato, cera de abelha e óleo essencial de bamburral.....	46
Tabela 6. Parâmetros de cor e opacidade dos filmes de alginato, cera de abelha e óleo essencial de bamburral.....	47
Tabela 7. Propriedades mecânicas dos filmes de alginato, cera de abelha e óleo essencial de bamburral.....	50
Tabela 8. Atividade antifúngica do óleo essencial de bamburral.....	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALG	Alginato de sódio
ANOVA	Análise de variância
BDA	Batata Dextrose Agar
CA	Cera de abelha
CGEM	Cromatografia Gasosa Com Espectro De Massa
CIE	International Commission on Illumination
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FAO	Food and Agriculture Organization
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IK	Índice de Kovats
ISO	International Organization for Standardization
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
NBR	Normas Brasileiras Regulamentadoras
OEB	Óleo essencial de bamburral
OEHSFF	Óleo essencial de Hyptis suaveolens do Fuma Feia
OEs	Óleos essenciais
PVA	Permeabilidade ao vapor de água
SS	Sólidos solúveis
TPVA	Taxa de permeabilidade ao vapor d'água

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	15
2.1 Conservação de alimentos e poluição por plásticos.....	15
2.1.1 Plásticos e poluição por plásticos.....	15
2.1.2 Utilização de embalagens plásticas na conservação de alimentos e seu impacto ambiental.....	15
2.2 Bioplásticos como alternativa aos plásticos convencionais.....	16
2.3 Filmes revestimentos e embalagens bioplásticas.....	16
2.4 Biopolímeros e aditivos usados na obtenção de bioplásticos.....	17
2.4.1 Alginato de Sódio.....	18
2.4.2 Cera de abelha (<i>Apis mellifera</i> L.).....	19
2.4.3 Bamburral (<i>Hyptis Suaveolens</i> L.).....	20
2.4.4 Óleos essenciais.....	20
2.4.4.1 Óleo essencial de Bamburral (<i>Hyptis Suaveolens</i> L.).....	21
2.4.5 Plastificantes.....	22
2.4.6 Tensoativos.....	23
2.5 Propriedades dos revestimentos e filmes bioplásticos.....	24
2.5.1 Propriedades mecânicas.....	24
2.5.2 Propriedades físico-químicas e de barreira.....	25
2.5.3 Propriedades ópticas.....	25
2.6 Banana cv. prata (<i>Musa</i> ssp.).....	25
2.6.1 Características gerais e aspectos econômicos da banana.....	25
2.6.2 Fisiologia da banana.....	26
2.6.3 Pós-colheita da banana.....	28
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	30
3.1 Obtenção, extração e caracterização do óleo essencial de bamburral.....	30
3.2 Delineamento experimental.....	31
3.2.1 Preparo da solução filmogênica.....	32
3.3 Caracterização dos filmes biopoliméricos.....	33
3.3.1 Espessura.....	33
3.3.2 Propriedade de barreira – permeabilidade ao vapor de água (PVA).....	34
3.3.3 Solubilidade em água.....	34
3.3.4 Propriedades óticas – cor e opacidade.....	35

3.3.5 Propriedades mecânicas.....	36
3.3.6 Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	36
3.4 Delineamento experimental do estudo de conservação pós-colheita da banana....	37
3.4.1 Taxa de respiração.....	38
3.4.2 Avaliação das propriedades físicas das bananas.....	39
3.4.2.1 Perda de massa.....	39
3.4.2.2 Firmeza.....	39
3.4.2.3 Cor.....	39
3.4.3 Avaliação das propriedades químicas das bananas.....	39
3.4.3.1 Sólidos solúveis (SS).....	39
3.4.3.2 Acidez titulável.....	40
3.4.3.3 Amido.....	40
3.4.4 Avaliação sensorial.....	40
3.4.5 Ensaio in vitro: <i>Colletotrichum sp</i> e <i>Fusarium sp</i>	41
3.5 Tratamento estatístico dos dados.....	42
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	42
4.1 Caracterização do óleo essencial de Bamburral.....	42
4.2 Características dos filmes biopoliméricos.....	44
4.2.1 Espessura, taxa de permeabilidade ao vapor de água (TPVA) e permeabilidade ao vapor de água (PVA) e solubilidade.....	44
4.2.2 Cor e opacidade.....	46
4.2.3 Microestruturas de superfície.....	48
4.2.4 Propriedades mecânicas.....	49
4.3 Avaliação da aplicação dos filmes na banana.....	51
4.3.1 Taxa de respiração.....	51
4.3.2 Avaliação das características físicas das bananas.....	53
4.3.2.1 Perda de peso.....	53
4.3.2.2 Firmeza.....	55
4.3.2.3 Cor da casca.....	56
4.3.3 Avaliação das características químicas das bananas.....	58
4.3.3.1 Acidez.....	58
4.3.3.2 Sólidos solúveis.....	60
4.3.3.3 Amido.....	62
4.3.4 Ensaio in vitro da atividade antifúngica do óleo essencial de bamburral.....	64

4.3.5 Avaliação sensorial dos frutos.....	65
5. CONCLUSÕES.....	69
REFERÊNCIAS.....	70

1. INTRODUÇÃO

O uso de plásticos convencionais, derivados do petróleo, na fabricação de embalagens para alimentos tem sido uma prática comum por muitos anos. Esses materiais são amplamente utilizados devido às suas propriedades versáteis e eficácia, desempenhando um papel importante na preservação de alimentos, na redução de desperdícios e na otimização do espaço durante o manuseio e transporte (MENDES; PEDERSEN, 2021).

No entanto, com a crescente busca por soluções mais sustentáveis, os polímeros derivados do petróleo tornaram-se menos atraentes (GONZÁLEZ; FELIX; ROMERO, 2022). Desde sua popularização, aproximadamente 9,2 bilhões de toneladas métricas de plásticos foram produzidas, gerando cerca de 6,3 bilhões de toneladas métricas de resíduos. Desses, apenas 9% foram reciclados, 12% incinerados, e os 79% restantes acumulam-se em aterros sanitários e no meio ambiente (GEYER; JAMBECK; LAW, 2017).

Esse cenário é agravado pela estimativa de que entre 4,8 e 12,7 milhões de toneladas de plástico entram nos oceanos anualmente, incluindo os microplásticos – partículas menores que 1 mm. Nos ambientes marinhos, os polímeros mais prevalentes incluem poliamida, polietileno, polipropileno, poliéster e poliestireno, que correspondem aos principais plásticos produzidos mundialmente. Estudos preveem que, até 2050, os oceanos poderão conter mais plásticos do que peixes (SHAFQAT *et al.*, 2021; SAVAGE; PORTER; SIMPSON, 2022).

Nesse contexto, os biopolímeros de base biológica e biodegradável têm ganhado destaque. Esses materiais, extraídos de biomassas ou resíduos industriais, apresentam aplicações em diversos setores, incluindo embalagens e sacos de coleta de lixo, promovendo uma economia mais circular (MOSHOD *et al.*, 2022). Todavia, os biopolímeros ainda enfrentam desafios técnicos, como alcançar características semelhantes aos plásticos convencionais, incluindo resistência mecânica e flexibilidade mais elevadas e menor permeabilidade ao vapor de água (PORTA; SABBAH; PIERRO, 2020).

Novas pesquisas têm explorado o uso de filmes biopoliméricos compostos por proteínas, carboidratos, lipídeos, plastificantes e aditivos que melhoram suas propriedades mecânicas, físico-químicas e de barreira (MIRANDA; SPERANZA; SATO, 2023). No setor de alimentos, por exemplo, as embalagens biodegradáveis ajudam a prevenir riscos químicos, físicos e biológicos (VASILE; BAICAN, 2021).

Entre os materiais promissores, o alginato de sódio se destaca. Trata-se de um polissacarídeo linear biodegradável, composto por unidades de β -D manuronato e α -L-

glucuronato, amplamente utilizado em alimentos, biomedicina, tratamento de água e embalagens devido à sua capacidade de formação de filmes e propriedades de espessamento (ZHANG *et al.*, 2023). A cera de abelha, outro material relevante, é um composto hidrofóbico complexo, contendo ácidos graxos, álcoois e ésteres, que proporciona aos filmes propriedades de barreira ao vapor de água e resistência à umidade, além de ser biodegradável (HOSSEINI; MOUSAVI; MCCLEMENTS, 2023).

A planta *Hyptis suaveolens* (L.), conhecida como bamburral, apresenta potencial como agente antifúngico e antibacteriano devido à presença de óleos essenciais aromáticos, contendo monoterpenoides e sesquiterpenoides. Estudos destacam sua eficácia contra bactérias Gram-positivas e Gram-negativas (MISHRA *et al.*, 2021; NÓBREGA *et al.*, 2022).

A bananicultura, por sua vez, desempenha um papel importante no comércio global, com 19,3 milhões de toneladas exportadas em 2023. O Brasil, além de maior consumidor mundial, ocupa o quarto lugar em produção, com 6,6 milhões de toneladas anuais, sendo metade proveniente da agricultura familiar. Esse setor movimenta R\$ 13,8 bilhões por ano e gera cerca de 500 mil empregos, reforçando seu papel econômico e social (FAO, 2023; EMBRAPA, 2024).

Neste estudo, busca-se desenvolver um filme biopolimérico antifúngico biodegradável utilizando o método de *casting*. A formulação baseia-se em uma mistura de cera de abelha (CA) e alginato de sódio (ALG), combinada ao óleo essencial de bamburral (OEB) como agente antifúngico. Foram avaliadas as influências do OEB nas propriedades mecânicas, de barreira, estabilidade térmica e degradação dos filmes, além de suas propriedades antibacterianas e o impacto na preservação de bananas. O objetivo é identificar uma composição que potencialize a atividade antioxidante, melhore as propriedades físico-químicas e promova maior extensibilidade com menor rigidez.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Conservação de alimentos e poluição por plásticos

2.1.1 Poluição por plásticos

Atualmente, devido a busca por um mundo mais sustentável, existe uma rigorosa indagação referente ao consumo de plásticos convencionais, ou seja, aqueles a base de polímeros provenientes do petróleo. O plástico convencional apresenta boas características como resistência, flexibilidade e propriedades de barreira e é amplamente utilizado na indústria (GONZÁLEZ; FELIX; ROMERO., 2022).

Dos 8,3 bilhões de toneladas métricas de plásticos fabricados foram gerados 6,3 mil toneladas de resíduos, onde somente 9% foram reciclados, 12% incinerados e os 79% restantes foram acumulados em aterros sanitários e no meio ambiente aberto. Todos os anos, aproximadamente 4,8 a 12,7 milhões de toneladas de plástico entram nos oceanos, onde após sofrerem os processos de intemperismo são degradados em partículas menores. Os microplásticos compreendem uma categoria recém adotada de poluentes plásticos com partículas menores do que 1 mm, tendo como prevalência polimérica nos ambientes marítimos a poliamida, polietileno, polipropileno, poliéster e poliestireno, que representam os principais polímeros produzidos no mundo. As projeções sugerem que até 2025 cerca de 150 milhões de toneladas métricas de plástico estarão nos oceanos do mundo e que até 2050 o mar deverá ter uma carga maior de plástico do que peixes (GEYER; JAMBECK; LAW, 2017; SHAFQAT *et al*, 2021; SAVAGE; PORTER; SIMPSON., 2022).

2.1.2 Utilização de embalagens plásticas na conservação de alimentos e impacto ambiental

Por se tratar de um produto com inúmeras utilizações, a produção de embalagens plásticas ultrapassou 147 milhões de toneladas e continua a aumentar anualmente (PLASTICSEUROPE., 2020). O plástico tornou-se uma escolha predominante para embalagem de alimentos devido à sua alta resistência, durabilidade e custo. Uma embalagem adequada reduz as perdas em todos os níveis da cadeia de abastecimento, facilitando o manuseio, contenção e transporte. Apesar de suas propriedades benéficas, as embalagens plásticas geram rapidamente resíduos quando não ocorre o gerenciamento adequado de seu descarte. A execução de diversos sistemas de gerenciamento de resíduos parece não surtir efeito diante do aumento dos volumes anuais de resíduos plásticos. Entre os problemas enfrentados pelas nações, aponta-se a deficiência de instalações de reciclagem e a dificuldade em alcançar os requisitos mínimos para reutilização desse produto (NAVARRE *et al.*, 2022).

2.2 Bioplásticos como alternativa aos plásticos convencionais

Atualmente as nações necessitam explorar métodos que resultem na redução de combustíveis fósseis para fabricação de polímeros, principalmente devido aos impactos ambientais e de riscos à saúde. O surgimento dos bioplásticos atrai um conjunto de consumidores ecologicamente corretos (FINDRIK; MEIXNER., 2023).

Diferentemente dos plásticos convencionais, os bioplásticos são derivados de substâncias biológicas e alguns são biodegradáveis, deste modo, digeríveis em água e dióxido de carbono, ou também em metano e misturas inorgânicas como subprodutos adicionais, onde a biodegradação de plástico se refere à degradação biológica de plásticos pela atividade enzimática de microorganismos degradadores de plástico, como bactérias, fungos e algas para assimilação de energia e carbono (IDRIS *et al.*, 2023).

2.3 Embalagens biopoliméricas: revestimentos e filmes

Embora revestimentos e filmes sejam frequentemente confundidos como semelhantes, eles diferem no método de aplicação. A principal diferença é que os filmes são criados como laminados sólidos e, em seguida, aplicados aos alimentos, enquanto os revestimentos são aplicados em forma líquida. Ambos são tipos de embalagens primárias que podem ser feitas de ingredientes comestíveis. Os revestimentos comestíveis podem ser aplicados diretamente aos alimentos de várias formas, como imersão e pulverização, por exemplo. No caso dos filmes, estes são previamente formados e podem ser utilizados para elaboração de sacolas (MOHAMED *et al.*, 2020; VILVERT *et al.*, 2022).

Os revestimentos são compostos por substâncias biopoliméricas que revestem produtos alimentícios através da aplicação de uma camada fina geralmente inferiores a 0,3 mm. Além disso, algumas formulações proporcionam ação antimicrobiana (PAIVA *et al.*, 2020), evitam alterações sensoriais indesejáveis, atuam como barreira a gases (retardam perda de massa, taxa de respiração, e suprimem a atividade de espécies reativas de oxigênio) (AROUCHA *et al.*, 2024; SILVA *et al.*, 2024; MENEZES *et al.*, 2023). Os revestimentos a base de polissacarídeos, são amplamente utilizados e seu potencial é ampliado ao incorporar aditivos, tais como substâncias hidrofóbicas, extratos vegetais, óleos essenciais, etc, tornando-os ainda mais potentes (BAJAJ *et al.*, 2023).

Além dos filmes comuns utilizados em embalagens, as indústrias também produzem os filmes denominados ativos, cujas substâncias são incorporadas para exercerem funções específicas, como compostos antioxidantes e antimicrobianos (MENEZES *et al.*, 2024; SILVA

et al., 2024). Esses componentes interagem com os alimentos, protegendo-os e prolongando sua vida útil, ao mesmo tempo em que preservam características sensoriais, como aparência e sabor. Isso acontece porque influenciam diretamente diversos processos nos alimentos, como alterações fisiológicas (respiração de frutas e vegetais), químicas (oxidação de gorduras), físicas (prevenção de injúrias e danos mecânicos) e microbiológicas (FILHO *et al.*, 2022).

As propriedades desejáveis de embalagens bioplásticas incluem a resistência mecânica adequada, estabilidade térmica, reciclabilidade, biodegradabilidade e barreira contra vapor de água e oxigênio (LEITE *et al.*, 2020).

2.4 Biopolímeros e aditivos usados na obtenção de bioplásticos

O termo "biopolímeros" refere-se a polímeros encontrados em matéria viva. Suas moléculas são organizadas em cadeias, que podem ser lineares, ramificadas ou reticuladas. Esses biopolímeros são formados em estruturas hierárquicas e podem incorporar diversas unidades monoméricas, permitindo-lhes formar heteropolímeros. Além de suas estruturas primárias, essas unidades monoméricas se organizam molecularmente para criar estruturas secundárias e, eventualmente, adotar uma configuração tridimensional, resultando em uma estrutura terciária (GEORGE *et al.*, 2020).

Filmes comestíveis e biodegradáveis são geralmente elaborados a partir de biopolímeros extraídos de macromoléculas biológicas, como proteínas (por exemplo, zeína, gelatina, caseína, etc), lipídios (como cera de carnaúba e cera de abelha) e polissacarídeos (tais como pectina, quitosana, amido e alginato). Esses filmes têm a capacidade de incorporar compostos naturais com bioatividades e propriedades físico-químicas que os tornam adequados para a criação de filmes inteligentes, ativos e bioativos (FILHO *et al.*, 2022).

Além disso, é comum a adição de glicerol como plastificante para aprimorar as propriedades físicas e mecânicas em filmes quebradiços. Plastificantes tornam os filmes mais flexíveis, mas também os tornam mais fracos, sendo necessária a adição de outros biopolímeros, tornando o filme mais robusto e mais flexível ao mesmo tempo. Isso ocorre devido à formação de ligações intermoleculares, o que ajuda a melhorar a estrutura e as propriedades mecânicas do filme (ABERA; DURAISAMY; BIRHANU *et al.*, 2024).

Para facilitar a aplicação de revestimentos aquosos em superfícies hidrofóbicas de frutas e vegetais, também é comum se acrescentar tensoativos ao sistema de revestimento. Esses tensoativos interagem com as matérias-primas e exercem um impacto significativo nas propriedades intrínsecas das soluções formadoras de filme, afetando tanto as microestruturas

quanto as propriedades macroscópicas dos filmes resultantes. Eles são eficazes na redução da tensão superficial e na melhoria da molhabilidade das soluções formadoras de filme. Além disso, a distribuição dos tensoativos é essencial para otimizar a molhabilidade e garantir uma aplicação uniforme do revestimento (DENG *et al.*, 2023).

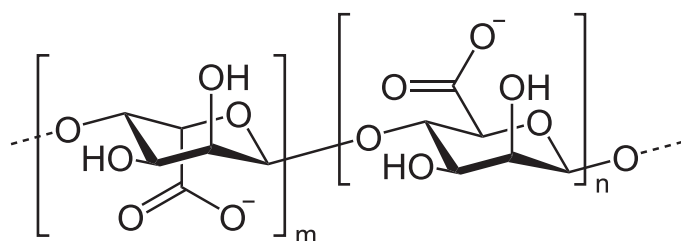
2.4.1 Alginato de sódio

O alginato é um biopolímero hidrofílico composto por dois ácidos urônicos, extraído de algas marinhas marrons. Além de suas propriedades coloidais, possui a capacidade de formar géis ao reagir com cátions metálicos multivalentes. O alginato também exerce um impacto considerável na degradação microbiana. Embora o alginato já apresente propriedades antioxidantes, sua combinação com outros compostos tem demonstrado eficácia na prevenção da permeação de oxigênio através do filme (LINH *et al.*, 2024).

Polissacarídeos, como o alginato de sódio, são compostos sustentáveis e não tóxicos. Esses compostos são amplamente disponíveis na natureza e apresentam permeabilidade seletiva ao dióxido de carbono e ao oxigênio. Tais propriedades permitem que revestimentos e filmes comestíveis à base de polissacarídeos prolonguem a vida útil das frutas (MOHAMED *et al.*, 2020).

Devido a essas características, o alginato de sódio é amplamente utilizado por diversos pesquisadores, destacando-se em campos como o da indústria de alimentos em suas embalagens, farmacêutica, biomedicina e no tratamento de água. Esse biopolímero apresenta propriedades naturais hidrofílicas, de boa formação de filme, espessamento e de biodegradabilidade. Na sua formação molecular, o alginato de sódio é composto por unidades de β -D manuronato e α -L-glucuronato ligados por ligações glicosídicas 1-4, como pode ser observado na Figura 1. (ZHANG *et al.*, 2023).

Figura 1. Estrutura molecular do alginato de sódio.



Fonte: Gonçalves., 2021.

O filme composto por alginato de sódio puro proporciona atividade antimicrobiana,

porém, a associação de alginato de sódio a óleo essenciais ricos em fenólicos intensifica a capacidade antioxidante nos filmes, além disso, essa associação desempenha um papel importante no processo antioxidante nos alimentos (LU *et al.*, 2021).

Embora o alginato de sódio apresente alta segurança, boas propriedades de formação de filme e flexibilidade, ele possui baixa resistência mecânica e desempenho limitado como barreira à água. No entanto, quando combinado com outros biopolímeros e componentes ativos, esse composto biopolimérico pode melhorar a capacidade de preservação do filme, visto que o efeito preservativo de um único substrato formador de filme é limitado (WANG *et al.*, 2024).

2.4.2 Cera de abelha (*Apis mellifera* L.)

A cera de abelha é uma substância complexa (formada a partir dos açúcares presentes no mel, como frutose, glicose e sacarose) produzida por abelhas *Apis mellifera* e utilizada na construção dos favos de mel. Esse material é secretado por abelhas operárias que liberam a cera líquida a partir de glândulas especializadas localizadas na parte inferior do abdômen. A cera, em contato com o ar, se solidifica imediatamente em pequenas escamas brancas. Sua cor amarela provém do contato com outras substâncias (mel, pólen e própolis) que se misturam com a cera dentro da comeia. A tonalidade tende a ficar mais escura com o tempo, devido à oxidação que acontece pela presença de resíduos de casulos, fezes larvais, peles de pupas e própolis (FELICIONI *et al.*, 2019).

Diversos constituintes são encontrados na sua composição, dentre eles, hidrocarbonetos de cadeia longa (cerca de 14%), ácidos graxos (12%), álcoois (1%) e ésteres (67%) e substâncias exógenas como resíduos de própolis, pólen e pequenos pedaços de componentes florais. A cera de abelha apresenta um ponto de fusão relativamente baixo (65 °C) e é insolúvel em água e álcool etílico frio. Sua natureza hidrofóbica acontece devido aos grupos metileno [- (CH₂)-] da cadeia interna, que representam mais de 95% dos carbonos presentes (HOSSEINI *et al.*, 2023).

A utilização de cera de abelha tem se mostrado eficaz no aumento da vida útil pós-colheita de frutas climatéricas, reduzindo a incidência de podridões, retardando o pico respiratório, e consequentemente o amadurecimento. A cera de abelha apresenta grande potencial para resistência à umidade e ao vapor d'água quando associada a biopolímeros, mas quando isolada não é capaz de constituir estruturas autossustentáveis e, portanto, não pode ser empregada isoladamente na fabricação de filmes para embalagens (TRINH; SMITH; MEKONNEN., 2022).

2.4.3 Bamburral (*Hyptis Suaveolens* L.)

A *Hyptis suaveolens* (L.) é uma erva dicotiledônea de cheiro adocicado popularmente conhecida como bamburral que pertence à família Lamiaceae, que contém 236 gêneros e 6.900 a 7.000 espécies de plantas aromáticas. Apresenta folhas simples e opostas, raramente verticiladas, petioladas ou sésseis, pilosas (MISHRA *et al.*, 2021).

O bamburral é nativo da região tropical americana, porém, essa planta se tornou popular por ser invasora em todo o mundo. É uma erva de crescimento rápido e com touceiras densas, muito comum em terrenos, nas laterais de estradas, pátios de pastagem e currais de gado. Seu desenvolvimento pode alcançar aproximadamente de 0,4 a 2,0 m de altura, seu caule é ereto, quadrangular, piloso (com pelos) e de coloração verde. Além disso, suas folhas são ovaladas ou obovadas com 3 a 5 cm de comprimento e 2 a 4 cm de largura, tendo margens serrilhadas e caules longos. Seus pecíolos têm até 3 cm de comprimento, e a planta floresce cedo dentro de 2 a 3 meses da polinização por insetos ou outros agentes (ÁGUELE *et al.*, 2023). A classificação da espécie *Hyptis suaveolens* L. pode ser analisada na Tabela 1 (GBIF, 2023).

Tabela 1. Classificação científica da planta Bamburral.

Reino	Plantae
Filo	Tracheophyta
Classe	Magnoliopsida
Ordem	Lamiales
Família	Lamiaceae
Gênero	Mesosphaerum P.Browne
Espécie	<i>Hyptis suaveolens</i> (L.) Poit

Fonte: Adaptado do gbif.org (2023).

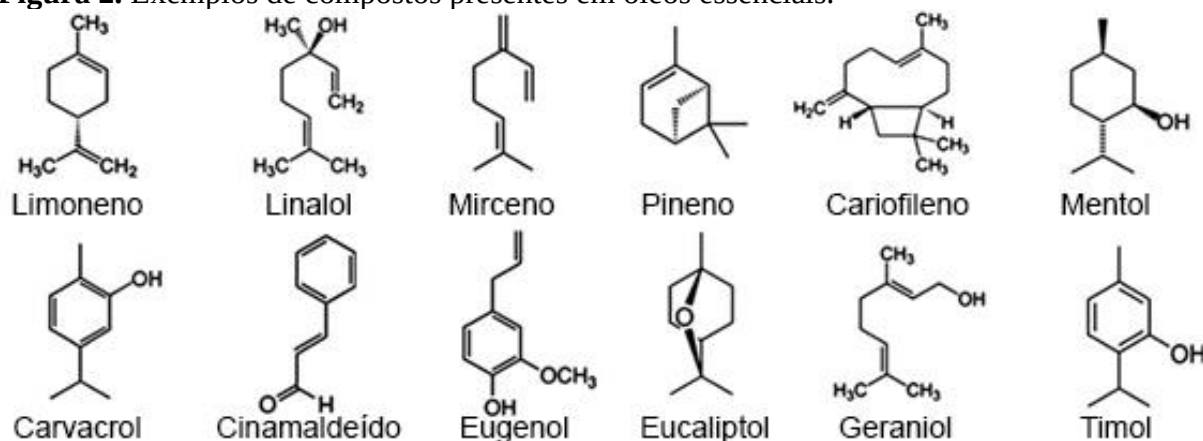
2.4.4 Óleos essenciais

Os óleos essenciais (OEs) representam produtos do metabolismo secundário das plantas, apresentando diversas funções como de defesa a pragas e atração de polinizadores (BRITO *et al.*, 2013). Conforme definido pela norma 9235 da *International Organization for Standardization* (ISO), óleos essenciais são produtos derivados de matérias-primas naturais de origem vegetal. Eles são obtidos através de diferentes métodos, tais como destilação a vapor, processos mecânicos a partir do epicarpo de frutos cítricos, ou destilação a seco, após a separação da fase aquosa, se presente, por meio de processos físicos (SHARMA *et al.*, 2021).

Os OEs apresentam propriedades funcionais, como atividade antioxidante e antibacteriana, e sua ampla variação de aplicações despertou o interesse da indústria alimentícia. Nesse contexto, a incorporação de óleos essenciais em filmes comestíveis tem se mostrado uma estratégia eficiente para a conservação de alimentos e a ampliação da vida útil. Contudo, a eficácia dos óleos essenciais depende de diversos fatores, como sua estrutura, composição e fonte (KUMAR *et al.*, 2024).

Os compostos constituintes dos OEs são classificados principalmente como hidrocarbonetos (terpenos, sesquiterpenos, diterpenos) e compostos oxigenados (ésteres, aldeídos, cetonas, óxidos, fenóis, ácidos, álcoois, lactonas). Dentre esses, os terpenos se destacam por serem encontrados em maior quantidade. Os terpenos são formados por unidades de isopreno e possuem alta volatilidade. Ao sofrerem alterações bioquímicas, passam a ser denominados terpenoides. (VIANNA *et al.*, 2021). As estruturas químicas de alguns compostos típicos presentes em OEs são mostradas na Figura 2.

Figura 2. Exemplos de compostos presentes em óleos essenciais.



Fonte: VIANNA *et al.*, 2021.

2.4.4.1 Óleo essencial de Bamburral (*Hyptis Suaveolens* L.)

O Bamburral apresenta um aroma característico devido à presença de óleos essenciais contendo compostos aromáticos, como fenólicos, di e triterpenóides, alcalóides, flavonoides, taninos e saponinas (MISHRA *et al.*, 2021). Na literatura, estudos sobre o óleo essencial de bamburral relatam a composição química volátil de folhas e caule, e as mudanças nas composições e características de acordo com a localização geográfica em que se encontram, como demonstrado para os quimiotipos e segundo a composição majoritária: sabineno e 1,8-cineol (19,5% e 18,6%, Itália); 1,8-cineol e cariofileno (16,17% e 10,33%, China); β -cariofileno e sabineno (15,99% e 18,57%, Nordeste do Brasil); sabineno e 1,8-cineol (26,9% e 26,4%,

Burquina Faso); 1,8-cineol e fenchona (9,60% e 35,31%, Norte do Brasil); Guaiol e α -copaeno (19,5% e 15,38%, Nigéria) e Trans-cariofileno e Dihidrotaquisterol (40,2% e 17,2%, Índia) (CANALE *et al.*, 2013; XU *et al.*, 2013; BEZERRA *et al.*, 2017; WANGRAWA *et al.*, 2018; PENICHE *et al.*, 2022; DANIA; OLALLEYE, 2022; MOOLA *et al.*, 2023).

Ainda nessa perspectiva, devido a sua variação de compostos, na literatura encontram-se diversas aplicações do óleo essencial de bamburral. A eficácia desse produto que demonstrou efeitos no combate ao mosquito *Aedes aegypti* devido sua capacidade larvicida (MOOLLA *et al.*, 2023), na fabricação de biopesticidas (POKHREL; CHODEN, 2022) e na medicina como no tratamento de infecções, úlceras gástricas e doenças cutâneas parasitárias (BOTCHA; PRATTIPATI, 2023). A *H. suaveolens* apresenta atividade antifúngica e antibacteriana de amplo espectro contra bactérias Gram-positivas e Gram-negativas devido à presença de compostos como monoterpenoides ou sesquiterpenoides e seus derivados oxigenados (NÓBREGA *et al.*, 2022).

2.4.5 Plastificantes

Os plastificantes são aditivos utilizados em soluções filmogênicas junto a biopolímeros. Esses materiais tem como finalidade aumentar a flexibilidade, durabilidade e processabilidade do produto final, evitando encolhimento ou quebra durante a deformação. Esses compostos possuem baixo peso molecular e um elevado ponto de ebulição. A incorporação de plastificantes pode impactar diversas propriedades físicas do biopolímero, incluindo viscosidade, grau de cristalinidade, temperatura de transição vítrea, dureza e densidade (TONG; XIAO; LIM *et al.*, 2013).

A adição dos plastificantes diminui o atrito intermolecular entre cadeias de polímeros. O aumento da flexibilidade da parte plástica do filme faz com que as moléculas do polímero deslizem umas sobre as outras. Nesse sentido, os plastificantes atuam como lubrificantes durante o movimento das moléculas do polímero reduzindo sua resistência ao deslizamento (BEN; SAMSUDIN; YHAYA, 2022).

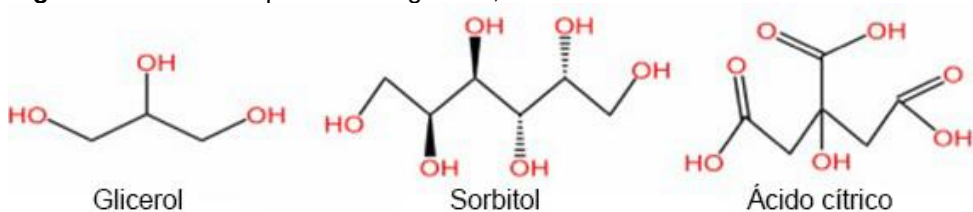
Durante a escolha do plastificante é importante levar em consideração o grau de plasticidade do polímero. Também é importante levar em consideração a composição química do plastificante, a presença de grupos funcionais e o peso molecular. Ainda nesse sentido, deve-se levar em consideração critérios como a compatibilidade entre o polímero e o plastificante, a concentração utilizada, os requisitos de processamento, as propriedades físicas, térmicas e mecânicas do produto final, além da relação custo-benefício e da toxicidade (BONIFACIO *et*

al., 2023).

Os plastificantes podem ser divididos em solúveis em água (hidrofílicos) e insolúveis (hidrofóbicos), sendo a solubilidade em água um fator determinante. A água, embora volátil, atua como um plastificante natural para biopolímeros reduzindo a temperatura de transição vítrea ao aumentar o espaço livre entre as cadeias poliméricas. Polióis, como glicerol e sorbitol, são eficazes na melhora das propriedades de filmes à base de biopolímeros, aumentando a flexibilidade e a ductilidade (ESLAMI *et al.*, 2023).

O glicerol, um triol altamente solúvel em água, é um subproduto de processos como a transesterificação de óleos e gorduras e é amplamente utilizado nas indústrias alimentícia e farmacêutica por suas propriedades seguras e não tóxicas (YADAV; YADAV; AHMARUZZAMAN, 2024). Ele favorece a formação de ligações de hidrogênio com polímeros hidrofílicos, melhorando a flexibilidade e reduzindo a fragilidade, por exemplo em filmes de alginato. Além do glicerol, existem outros plastificantes como sacarose, sorbitol, propilenoglicol e ácido cítrico (Figura 3) que também são altamente solúveis em água e convenientes de usar (YERMAGAMBETOVA *et al.*, 2024). As estruturas químicas do glicerol, sorbitol e ácido cítrico podem ser analisadas na Figura 3 (YERMAGAMBETOVA *et al.*, 2024). Por outro lado, óleos naturais, como azeite e óleo de rícino, são considerados plastificantes hidrofóbicos seguros para aplicações alimentícias, apresentando baixas toxicidade e tendência a migrar para o alimento (MOTELICA *et al.*, 2020).

Figura 3. Estruturas químicas do glicerol, sorbitol e ácido cítrico.



Fonte: YERMAGAMBETOVA *et al.*, 2024.

2.4.6 Tensoativos

Tensoativos são frequentemente empregados na indústria alimentícia para alcançar um equilíbrio entre as propriedades hidrofílicas e lipofílicas. Eles melhoram a emulsificação, pois se dispersam facilmente na interface entre óleo e água, facilitando a mistura dos componentes. No entanto, a escolha do tensoativo apropriado deve ser realizada de acordo com as condições específicas de cada sistema (ZHAO *et al.*, 2023).

Na produção de alimentos, pesquisadores estão desenvolvendo diversos métodos para o uso de tensoativos. Os principais tensoativos usados em alimentos são divididos em dois grupos,

os sintéticos (tweens e spans) e os naturais (proteínas e fosfolipídios). Os sintéticos já têm sua eficácia comprovada como bons estabilizadores. No entanto, os tensoativos naturais também surgem como uma nova opção viável, embora suas atividades ainda necessitem de mais estudos para compreender melhor sua aplicação no mercado alimentício (FUENTES *et al.*, 2021).

Os tweens (80 e 20), ou ésteres de polioxietileno sorbitano, são os emulsificantes sintéticos mais comumente utilizados. Esses produtos tem um equilíbrio hidrofílico-lipofílico de 15,0, o que lhes permite demonstrar bons efeitos de emulsificação (ZHAO *et al.*, 2023). Também, os oleatos de sorbitano ou span (40, 60 e 80) são compostos utilizados como surfactantes em revestimentos para alimentos (SAURABH *et al.*, 2016).

Também é possível obter tensoativos através da saponificação de lipídios. Esse material lipídico saponificado utiliza principalmente ácidos graxos de sódio produzidos a partir do tratamento alcalino de lipídios, aumentando a dispersibilidade dos lipídios (ZHANG; FAN; LI *et al.*, 2024).

2.5 Propriedades dos revestimentos e filmes bioplásticos

Para estender a vida útil dos alimentos, os revestimentos e filmes devem possuir uma boa resistência à ruptura e, além disso, devem reduzir as trocas de umidade, lipídios, voláteis e gases entre os alimentos e o ambiente ao redor. Em vegetais e frutas frescas devem apresentar baixa permeabilidade ao vapor de água para reduzir as taxas de dessecação, enquanto a permeabilidade ao oxigênio deve ser baixa o suficiente para retardar a respiração (MOHAMED *et al.*, 2020).

2.5.1 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas mais importantes dos filmes são a resistência à tração, o módulo de Young e o alongamento até a ruptura e estão intimamente relacionados à estrutura do material. O módulo de Young, também conhecido como módulo de elasticidade, é fundamental para definir a rigidez do filme. Valores elevados desse módulo indicam um maior grau de rigidez do material. Além disso, diferenças significativas na resistência à tração podem ocorrer dependendo da natureza dos materiais utilizados. A estrutura microscópica do filme e as forças intermoleculares entre seus componentes estão diretamente associadas à resistência à tração e ao alongamento na ruptura. Quando partículas ou matrizes quimicamente semelhantes são dispersas, elas tendem a interagir de forma mais intensa, funcionando como pontos de fixação que diminuem a mobilidade das cadeias e, assim, aumentam a resistência à tração

(SHIVANGI *et al*, 2021).

Na aplicação de filmes e revestimentos em alimentos, a resistência adequada do material é necessária para que aconteça a proteção do alimento durante as fases de transporte, distribuição e exposição antes do consumo, evitando a entrada de contaminantes e a deterioração por oxidação, corrosão e estresse mecânico. Sendo assim, essa proteção está diretamente associada a integridade e qualidade do alimento (MOHAMED *et al*, 2020).

2.5.2 Propriedades físico-químicas e de barreira

Os revestimentos desempenham um papel importante na modificação da atmosfera ao redor de produtos cobertos. Esses criam uma barreira para gases como O₂ e CO₂, permitindo influenciar as trocas gasosas entre o produto e o ambiente. Isso pode resultar em melhorias na estética, aroma e qualidade nutricional. Embora os revestimentos biodegradáveis à base de polissacarídeos sejam eficientes na barreira contra a permeação de gases, eles têm um desempenho inferior na resistência ao vapor de água devido à sua natureza hidrofílica. Comparados aos filmes derivados de matéria-prima petrolífera, os filmes biodegradáveis geralmente apresentam taxas mais altas de permeação ao vapor de água. Para superar essa limitação, muitos estudos incorporam lipídios em sua composição, pois estes possuem uma natureza hidrofóbica, resultando em taxas inferiores de permeação ao vapor de água em comparação aos filmes à base de hidrocolóides (GONÇALVES, 2021).

2.5.3 Propriedades ópticas

A cor, brilho e opacidade, principalmente nas indústrias alimentícias, resultam em um impacto relevante nos consumidores, principalmente na compra. Nesse sentido, ao desenvolver um filme ou revestimento, os materiais são priorizados observando também as características do alimento (IVERSEN *et al*, 2022). As mudanças da cor verde/vermelho, amarelo/azul e a luminosidade podem ser aferidos utilizando um colorímetro e realizando a medição dos parâmetros, respectivamente, a*, b*, L* com base na escala CIE (*International Commission on Illumination*) (TECHAVUTHIPORN *et al.*, 2024).

A escolha do material filmogênico deve ser feita com base nas necessidades específicas do produto. Na aplicação em frutas e vegetais, a aparência pode variar consideravelmente, desde produtos com brilho e aparência clara e natural até materiais que não possuem brilho e apresentam uma aparência oleosa (MORENO; SÁNCHEZ; SANTOYO, 2021). A transparência também pode variar de acordo com a dispersão e concentração do material no filme (HOSSEINI; MOUSAVI; MCCLEMENTS, 2023).

2.6 Conservação pós-colheita de Banana cv. (*musa ssp.*)

2.6.1 Aspectos econômicos da banana

No Brasil, a banana está entre as frutas mais cultivadas e consumidas, contribuindo significativamente para a economia agrícola. A área colhida total para a banana, em 2023, no país, é de 457.910 hectares, o que gerou uma renda em torno de 13,8 milhões de reais. Para região Nordeste foi de 183.960 hectares (cerca de 4 milhões de reais) e, no estado do Rio Grande do Norte, 8.584 hectares (cerca de 389 mil reais) (IBGE, 2022).

A região Nordeste é a maior produtora de banana do Brasil, seguida pelo sudeste, ambos são responsáveis por 35,1% e 33,5%, respectivamente da produção nacional. No Nordeste, o estado da Bahia possui a maior produção anual de 830.626 toneladas, seguido do Pernambuco com 490.440 t, Ceará 440.017 t e Rio Grande do Norte 238.553 t (EMBRAPA, 2022). Atualmente, São Paulo, Bahia e Minas Gerais são os principais estados produtores. O Brasil é o quarto produtor mundial de banana, depois da Índia, China e Indonésia, e a produção tem se estabilizado acima das 6,6 milhões de toneladas. As exportações correspondem a menos de 2% da produção total (IBGE, 2021).

Em 2023, a produção global da indústria agrícola atingiu aproximadamente 136 milhões de toneladas. A maior parte desse volume foi produzida na Ásia, com cerca de 68 milhões de toneladas, seguida pelas Américas, com 32 milhões de toneladas, e pela África, com 28 milhões de toneladas (FAOSTAT, 2023).

Diante desse cenário, em relação à exportação, a América Central e do Sul são responsáveis por fornecer, em média, 90% das bananas exportadas, cerca de 18 milhões de toneladas. Dentre os países que mais importam essa fruta, está a China, os Estados Unidos da América, Japão e Rússia (FAO, 2023).

Trata-se de um fruto tropical cujos subgrupos comerciais se destacam pelas características únicas em sabor, textura e nutrientes, como é o caso das cultivares: Cavendish, Prata, Maçã e Terra. (MATHUKMI; SARKAR; SURESH, 2022). No Brasil, 60% das áreas cultivadas com banana, são de variedades Prata, Prata-Anã e Pacovan (COSTA *et al.*, 2022).

2.6.2 Características específicas da banana

O gênero *Musa*, conhecido popularmente como banana, pertence à família “*Musaceae*”. As bananas têm suas origens em dois ancestrais principais: *Musa acuminata*, que contribuiu para o genoma A, e *Musa balbisiana*, que forneceu o genoma B. Estudos sugerem que as

cultivares derivadas do genoma B são mais resistentes ao estresse abiótico em comparação às que possuem o genoma A. Um exemplo é a banana prata (*M. acuminata* x *M. balbisiana*, AAB), que apresenta menos alterações em seus compostos voláteis quando exposta a temperaturas frias, quando comparada a outras variedades (FACUNDO *et al.*, 2022).

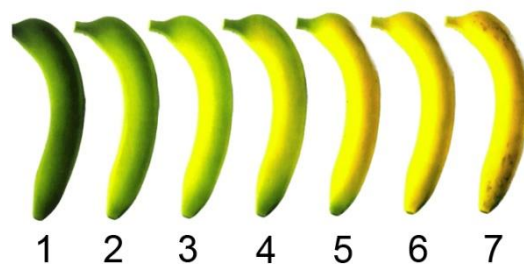
O ciclo de cultivo das bananeiras, desde o plantio até a colheita, pode variar entre 8 e 13 meses. Durante a colheita, os cachos de banana podem apresentar entre 100 e 400 frutos, dependendo das condições. Os cachos de banana podem ser colhidos quando a fruta estiver verde-madura (QAMAR; SHAIKH, 2018). Quando os frutos atingem a maturidade fisiológica ou comercial (CHITARRA; CHITARRA, 2005). Trata-se de um fruto climatérico, ou seja, quando colhidos apresentam metabolismo ativo (alta produção de etileno e taxa de respiração), e ocorre o processo de amadurecimento mesmo após a colheita (XAVIER, 2017), além disso, uma das principais dificuldades encontradas na sua conservação pós-colheita é sua sensibilidade aos danos de frio “*chilling*” (CHITARRA; CHITARRA., 2007).

Com a banana, comumente, pode-se acelerar seu amadurecimento ou retardá-lo após a colheita. Na comercialização para o mercado local, geralmente, se acelera o seu amadurecimento, e isso é feito em câmaras com atmosfera controlada, com uso de substâncias químicas (QAMAR; SHAIKH, 2018). Por outro lado, visando prolongar a vida útil dos frutos faz-se uso de várias tecnologias, como atmosfera controlada, atmosfera modificada e uso de substâncias químicas (CHITARRA; CHITARRA, 2005). No processo de amadurecimento, a banana apresenta diversas alterações, incluindo a mudança de cor, de verde ou verde-madura para um amarelo brilhante, com modificações na textura da polpa, e na conversão de amido em açúcar, no sabor e aroma (QAMAR; SHAIKH, 2018).

A mudança de coloração da banana pode ser analisada por meio da escala de maturação proposta por Von Loesecke (Figura 4), que é utilizada nas diretrizes de classificação de bananas no Brasil. Essa escala ajuda a determinar o estágio de maturação da fruta, facilitando o manejo e a comercialização (PBMH e PIF, 2006).

Do ponto de vista nutricional, a banana contém carboidratos (26g/100g), potássio (358mg/100g), fibra (2g/100g), magnésio (26mg/100g), manganês (0,42mg/100g) e vitaminas A (32ug/100g), C (21,6/100g) e vitaminas do complexo B (0,12mg/100g) (RANJHA *et al.*, 2022; TACO., 2011).

Figura 4. Estágios de maturação de Von Loesecke, de acordo com o grau de cor da casca



Legenda: completamente verde (1); verde com traços amarelos (2); mais verde que amarelo (3); mais amarelo que verde (4); amarelo com pontas verdes (5); completamente amarelo (6); amarelo com manchas marrons (7).

Fonte: PBMH e PIF., 2006.

2.6.3 Tecnologia pós-colheita para prolongar a vida útil dos frutos

A refrigeração e as embalagens filmogênicas desempenham papéis complementares na preservação de frutas e vegetais. A refrigeração desacelera o metabolismo dos frutos, reduzindo a respiração e as reações oxidativas, enquanto as embalagens oferecem uma barreira física que minimiza a perda de água e o intercâmbio gasoso. Essas embalagens ajudam a manter um equilíbrio ideal de gases, diminuindo o etileno e o oxigênio ao redor dos alimentos, o que retarda o amadurecimento e a deterioração. Dessa forma, contribuem para prolongar a qualidade dos produtos por mais tempo (JAFARZADEH *et al.*, 2021).

Todavia, a exposição prolongada a temperaturas muito baixas pode causar danos celulares aos tecidos, gerando estresse pelo frio e comprometendo suas qualidades comestíveis e comerciais (XIAO *et al.*, 2023). De acordo com a literatura, as temperaturas ideais para prolongar a vida útil da banana variam entre 13°C e 19°C. Entretanto, a 22°C, observa-se um aumento na velocidade de amadurecimento, enquanto temperaturas inferiores a 13°C podem causar danos por frio (LI *et al.*, 2023; FACUNDO *et al.*, 2022).

Segundo Jedermann *et al.* (2014), a temperatura de armazenamento tem uma relação direta com a vida útil das frutas. Em um estudo realizado em refrigeradores com ar normal e sacos de polietileno a 98% de umidade relativa, foi observado que, a uma temperatura ideal de 13 °C, a vida útil das frutas durava cerca de 30 dias. No entanto, para cada aumento de 10 °C na temperatura de armazenamento, a vida útil diminuía significativamente, chegando a apenas uma semana em uma temperatura de 25 °C.

Estudo sobre o uso de embalagem biodegradável à base de amido e quitina demonstraram que bananas armazenadas em condições ambientais (30 ± 3 °C e $40 \pm 10\%$ de umidade relativa) mantiveram-se verdes por até seis dias (TANPICHAI; THONGDONSON; BOONMAHITTHISUD., 2023). Resultados semelhantes encontrados em revestimentos à base

de óleo de alcaravia e quitosana sob condições de temperatura ambiente (25 ± 2 °C e 70% UR) e alginato (25 °C e 50% UR), que estenderam a vida útil das bananas para até sete dias (DAS *et al.*, 2023; YU *et al.*, 2024).

Nesse contexto, o estudo de Dwivany *et al.* (2020) demonstrou que a associação de revestimento a base de carragenina com baixas temperaturas pode prolongar a vida útil de bananas. Frutos revestidos e não revestidos foram armazenados em condições de 26 ± 1 °C e 20 ± 1 °C. Os frutos revestidos, em ambas condições, levaram dois dias a mais para amadurecer, quando comparado aos sem revestimento. Além disso, aqueles armazenados a 20 °C apresentaram menores alterações na coloração, menor perda de peso e uma conversão mais lenta de amido em açúcares simples, resultados atribuídos ao metabolismo mais lento, com redução da respiração e transpiração.

A embalagem funciona como uma barreira eficiente contra gases, prevenindo a perda de massa ao reduzir a transpiração e a respiração dos alimentos. Ela limita a entrada de O₂ e a saída de CO₂, modificando a atmosfera interna e impactando tanto a síntese de etileno quanto a taxa respiratória, devido à menor disponibilidade de O₂ (CHITARRA; CHITARRA, 2007; XAVIER, 2017).

As inovações no desenvolvimento de embalagens têm demonstrado resultados promissores, principalmente no uso de materiais à base de alginato de sódio (QUEIROZ *et al.*, 2025). Esse tipo de embalagem forma uma película protetora lavável que reduz significativamente a perda de massa, retarda o escurecimento e preserva a firmeza dos frutos. Sua eficiente capacidade de barreira limita a transmissão de vapor de água e gases, restringindo a liberação de etileno e, conseqüentemente, desacelerando o processo de amadurecimento (Yu *et al.*, 2024).

Nesse contexto, a cera de abelha também tem se destacado como um componente natural para a conservação de frutos, devido às suas propriedades funcionais e biodegradáveis. Quando incorporada a matrizes biopoliméricas, como alginato, quitosana ou amido, a cera de abelha intensifica a propriedade barreira, tornando o produto mais eficiente, principalmente na perda de água e a troca gasosa, reduzindo ainda mais a taxa de respiração e a transpiração dos frutos. Essa funcionalidade contribui para a preservação da firmeza, cor e textura, além de retardar o amadurecimento e o escurecimento enzimático. Por ser rica em compostos hidrofóbicos, melhora a resistência à umidade dos revestimentos, potencializando sua eficácia na extensão da vida útil de frutas frescas (HOSSEINI *et al.*, 2023).

Destaca-se também a utilização de óleo essencial na formulação de embalagens ativas,

que, quando incorporados à matriz polimérica formadora de filme, têm demonstrado um grande potencial devido às suas propriedades bioativas, como a atividade antimicrobiana (YANG *et al.*, 2022). Estudo recente demonstrou que a incorporação de óleo essencial melhorou consideravelmente as propriedades mecânicas, de barreira ao vapor de água e a capacidade antimicrobiana de embalagens na conservação de banana, havendo uma redução na taxa respiratória e um atraso no amadurecimento da fruta. Assim como, a diminuição da perda de peso, manutenção da cor da casca e conservação dos níveis de sólidos solúveis, acidez e açúcares durante um período de 12 a 24 dias. E, de acordo com a avaliação sensorial foi indicado a extensão da vida útil em oito dias à temperatura ambiente (25 °C e 75 % UR) (YAN *et al.*, 2024).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Essa pesquisa é do tipo experimental e de abordagem quantitativa, sendo dividida em duas etapas, a primeira trata da obtenção e caracterização dos filmes a base de alginato de sódio e cera de abelha com adição de óleo essencial de bamburral, e a segunda, a aplicação do produto obtido na primeira etapa no armazenamento de bananas, cultivar prata, observando seu potencial para desaceleração do processo de senescência através de análises físico-químicas entre os tempos de armazenamento e *shelf life*.

As etapas dessa pesquisa foram conduzidas no Laboratório de Processos Químicos, Laboratório de Tecnologia de Alimentos e Laboratório de Engenharia Eletroquímica, ambos na Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA).

3.1 Obtenção, extração e caracterização do óleo essencial de bamburral

As folhas de Bamburral (*Hyptis suaveolens* L.) foram coletadas durante o verão na zona de amortecimento do Parque Nacional da Fuma Feia (UTM: Longitude 662537.09 E; Latitude 9439319.89 N), em Mossoró/RN. O corte das folhas foi realizado com uma tesoura de poda e, em seguida, elas foram acondicionadas em sacos plásticos para transporte até o Laboratório de Processos Químicos da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, em Mossoró/RN.

A extração ocorreu de acordo com a metodologia de hidrodestilação proposta por Koketsu *et al.* (1991), onde o processo de destilação consiste em deixar o material em contato com a água em ebulição, em imersão ou flutuação, a depender da quantidade ou densidade do material que se propõe adicionar ao balão de fundo redondo. Ao acontecer a evaporação do líquido o óleo é arrastado e separado no aparelho dosador, enquanto por gravidade o excesso

de líquido retorna para o balão.

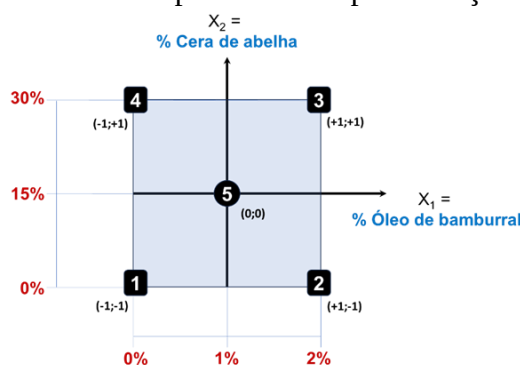
Seguindo esta metodologia, as folhas foram cortadas em pedaços menores (1 kg de folha) e colocadas em balão de 5 litros juntamente com 2 litros de água. Após 2 horas de hidrodestilação, o óleo foi retirado do sistema e armazenado em um frasco de vidro seco a -18 °C (evitando a evaporação e perdas das propriedades).

As análises através de Cromatografia Gasosa acoplada à Espectrometria de Massa (CGEM) do produto extraído foram realizadas no laboratório de Produtos Naturais da Embrapa Agroindústria Tropical, em Fortaleza/CE. As identificações dos constituintes foram efetuadas através de pesquisa em espectroteca e comparação com os dados da literatura.

3.2 Delineamento experimental

A produção de uma solução filmogênica destinada ao revestimento de bananas, com o intuito de prolongar sua vida útil durante o armazenamento e na prateleira, foi desenvolvida a partir de um planejamento fatorial 2^2 com adição de um ponto central, conforme a Figura 5 e a Tabela 2. Foram preparadas cinco composições diferentes, essa abordagem permitiu otimizar as condições de formulação para garantir a qualidade do revestimento (LONG *et al.*, 2022). A escolha do plastificante glicerol foi feita em função de sua compatibilidade com o alginato de sódio (JAMES *et al.*, 2024). O glicerol favorece a formação de ligações de hidrogênio com polímeros hidrofílicos, o que melhora a flexibilidade e reduz a fragilidade, principalmente em filmes de alginato (YERMAGAMBETOVA *et al.*, 2024). Para incorporar a cera de abelha, foi utilizado, como tensoativo, o tween 80. Esse material melhora a emulsificação, facilitando a dispersão entre óleo e água e facilitando a mistura dos componentes (ZHAO *et al.*, 2023).

Figura 5. Planejamento fatorial 2^2 com ponto central para solução filmogênica.



Fonte: Elaboração própria, 2024.

Na mistura filmogênica, a matéria seca total definida foi de 2%. Em relação à matéria lipofílica, a cera de abelha foi incorporada nas proporções de 15% e 30% em relação à massa seca total. O óleo essencial de baurburral também foi adicionado em quantidades de 5% e 10% da massa seca total. O tensoativo foi fixado em 10% em relação às quantidades de cera e óleo essencial. Após definir as proporções de matéria lipofílica, calculou-se a quantidade de matéria hidrofílica (alginato de sódio e glicerol) necessária para completar os 2% de matéria seca. Dessa quantidade restante, 15% foi de glicerol e 85% de alginato de sódio. A Tabela 2 traz as quantidades em porcentagens de cada componente para a produção de um filme de cada uma das quatro composições.

Tabela 2. Delineamento experimental - planejamento fatorial 2² com adição de um ponto central.

Filme	Valores codificados		Componentes da formulação (%)				
	Nº	X ₁	X ₂	Óleo de Bamburral*	Cera de abelha*	Tensoativo**	Alginato de sódio*
1	-1	-1	0	0	10	85,0	15,0
2	1	-1	2	0	10	75,7	13,4
3	1	1	2	30	10	47,6	8,4
4	-1	1	0	30	10	57,0	10,1
5.1	0	0	1	15	10	66,3	11,7
5.2	0	0	1	15	10	66,3	11,7
5.3	0	0	1	15	10	66,3	11,7

Observação: foi utilizada uma porcentagem de matéria seca de 2%. *Porcentagem em relação à massa seca total, **Porcentagens em relação à massa seca da Cera de abelha e óleo essencial de baurburral, ***Porcentagens em relação à massa do biopolímero (alginato de sódio).

Fonte: Elaboração própria, 2024.

3.2.1 Preparo da solução filmogênica

O processo de preparo das soluções que utilizam cera de abelha, óleo essencial e alginato foi dividido em três etapas e seguiu a metodologia proposta por Xue e Huang (2024) e Shi *et al* (2021), com adaptações.

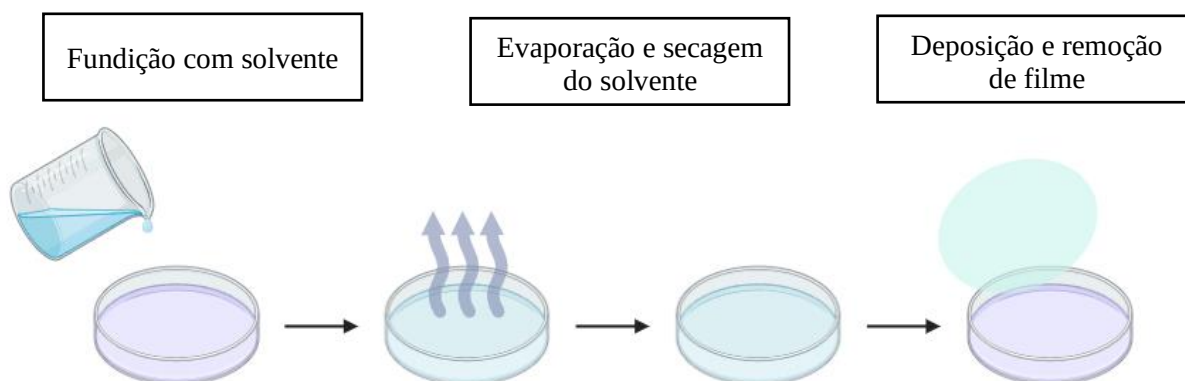
Na primeira etapa, o alginato de sódio, juntamente com o glicerol, foi dissolvido em 50 mL de água destilada e agitado a 200 rpm, com aquecimento. Utilizou-se um agitador magnético da marca Lucadema, modelo LUCA-0851, até a completa dissolução, a uma temperatura média de 70 °C por 15 minutos, resultando em uma solução límpida e transparente. Durante todo o processo de aquecimento, a água evaporada foi constantemente reposta.

Na segunda etapa, a cera de abelha e o tensoativo (tween 80), nas concentrações de 15% a 30%, foi pesada e aquecida a 80 °C até seu completo derretimento, adquirindo uma coloração branca característica. Em seguida, a solução de alginato foi aquecida a 80 °C e adicionada lentamente ao bécker que continha a cera derretida, sob agitação de 200 rpm, durante 15 minutos. Após essa adição, a mistura foi mantida em agitação a 200 rpm, sem aquecimento, por 15 minutos, até sua temperatura diminuir para 50 °C.

Na terceira etapa, considerando que os óleos essenciais possuem baixo ponto de ebulição (MAHANTA *et al.*, 2021), ele foi adicionado nas concentrações de 5% a 10%, juntamente com o tensoativo (tween 80). Essa mistura foi agitada a 200 rpm, sem aquecimento, por 15 minutos, enquanto a cera de abelha esfriava. Finalmente, a solução com o óleo essencial foi adicionada lentamente ao bécker que continha a cera e o alginato, mantendo a agitação a 200 rpm por mais 15 minutos.

Os filmes forma obtidos pelo método de *casting* (Figura 6), que consiste em dissolver o biopolímero em um solvente adequado, formar uma solução homogênea e despejá-la em uma forma, como uma placa de acrílico. Em seguida, o solvente é evaporado de maneira controlada (por secagem à temperatura ambiente ou em estufa), resultando na formação de um filme uniforme (SUHAG *et al.*, 2020). Nesse sentido, 100 mL da solução formadora de filme foram vertidos em placas de acrílico (15 cm × 15 cm) e deixados secar em temperatura ambiente de 25 °C, com 65% de umidade relativa, por 15 dias.

Figura 6. Método *casting* para formação de filme.



Fonte: Elaboração própria, 2025.

3.3 Caracterização dos filmes biopoliméricos

Os filmes biopoliméricos produzidos foram submetidos a análises de caracterização

para avaliar sua eficácia e segurança de acordo com sua finalidade de revestir produto alimentício. Os resultados da caracterização foram obtidos através da análise de cor, opacidade, permeabilidade ao vapor de água, solubilidade, propriedades mecânicas e microscopia eletrônica de varredura. A determinação da espessura dos filmes foi realizada pois é uma informação necessária à determinação de algumas propriedades dos filmes (permeabilidade ao vapor de água e propriedades mecânicas, por exemplo). Para estimar a precisão dos resultados, o erro experimental e as médias dos efeitos dos tratamentos, todas as análises foram realizadas em triplicata.

3.3.1 Espessura

A espessura dos filmes foi determinada conforme metodologia descrita por Zhang *et al* (2024) na qual, utilizando um micrômetro digital da marca Mitutoyo (Modelo MDC-25M, MFG/Japão) (precisão de 0,0001 mm) as espessuras foram medidas em 5 pontos diferentes em cada amostra e a espessura média do filme calculada.

3.3.2 Propriedade de barreira – permeabilidade ao vapor de água (PVA)

O teste PVA dos filmes seguiu os padrões estabelecidos na ASTM E96/E96M-22 e metodologia descrita por Queiroz *et al* (2024). Os filmes foram cortados em discos de 4,5 cm de diâmetro e selados em uma célula de permeação que continha 9 mL de água destilada, garantindo que a perda de massa do sistema ocorresse somente por meio da evaporação da água através do filme. O conjunto formado pela célula e pelo filme foi inicialmente pesado e, em seguida, transferido para um dessecador contendo sílica, mantido a 25 °C e com umidade relativa de 50%. As pesagens foram feitas em triplicata e realizadas a cada hora durante um total de 8 horas. A permeabilidade ao vapor de água (PVA) é então obtida usando a Equação 1:

$$WVP = (w \times L) / (A \times t \times \Delta P) \quad (1)$$

Onde:

PVA = permeabilidade ao vapor de água em g.mm/h.kPa.m²;

W = peso de água em g;

L = espessura média do filme(mm);

A = área exposta em m²;

t = tempo de permeação em h;

ΔP = diferencial de pressão de vapor de água através do filme em kPa.

Com os valores obtidos a partir da equação, construiu-se um gráfico relacionando as perdas de massa de cada filme em função do tempo. A inclinação da reta apresentada no gráfico, permite calcular a permeabilidade ao vapor de água (PVA) dos filmes.

3.3.3 Solubilidade em água

A determinação da solubilidade foi realizada em triplicata e seguiu a metodologia de Queiroz, Aroucha e Leite (2024). Primeiramente, os filmes foram cortados em quadrados de 4 x 4 cm e secos em estufa a 105 °C por 1 hora para determinar sua massa inicial. Em seguida, os pedaços foram imersos em 50 mL de água destilada sob agitação constante por 6 horas em agitador orbital Shaker a 100 rpm. Durante esse processo, o papel de filtro foi seco a 105 °C por 1 hora, para também determinar sua massa inicial. Por fim, as amostras que estavam em agitação foram filtradas, e o filtro foi novamente seco a 105 °C por 1 hora para pesagem da sua massa. Após a obtenção dos valores, a solubilidade foi determinada usando a Equação 2.

$$S = ((m_i - m_f) \div (m_i)) \times 100 \quad (2)$$

Sendo:

S é a solubilidade expressa em %;

m_i = Massa inicial do filme em g;

m_f = Massa final do filme em g.

3.3.4 Propriedades óticas – cor e opacidade

Para a avaliação de cor foi utilizada uma metodologia adaptada de Hutaeruk *et al* (2024) e Menezes (2021), por reflectometria, com o uso de um colorímetro (CR-20; Konica Minolta Inc., Japão). Um fundo de cor padrão branca ($L^*=94,2$, $a^*=0$, $b^*=0$) foi usado para calibrar o equipamento, e então medidos os parâmetros de 'L' que indica a luminosidade, 'a' a coordenada da cor verde/vermelho e 'b' da cor azul/amarelo. Utilizando-se esses valores obtidos, os índices de diferença total de cor (ΔE), brancura (WI) e amarelo (YI) das análises também foram calculados pelas Eqs. (3)-(5).

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L)^2 + (a^* - a)^2 + (b^* - b)^2} \quad (3)$$

$$WI = 100 - \sqrt{(100 - L)^2 + a^2 + b^2} \quad (4)$$

$$YI = 142.86b/L \quad (5)$$

Onde:

L^* , a^* e b^* são os valores dos parâmetros de cor da amostra de filme.

A opacidade foi avaliada utilizando um espectrofotômetro UV-vis, modelo EVO-600PC, THERMO, através da análise de absorbância e transmitância. A metodologia adotada foi descrita por Wardak *et al* (2024). As medidas foram realizadas em triplicata e a valores calculados utilizando a Equação 6.

$$\text{Opacidade}(1/\text{mm}) = \text{Abs}_{600}/d \quad (6)$$

Na qual:

Abs 600 é a absorbância a 600 nm;

d é a espessura média do filme (mm).

3.3.5 Propriedades mecânicas

Quanto às propriedades mecânicas, foram determinadas a resistência à tração, a alongação na ruptura e o módulo de Young, utilizando-se um equipamento de ensaio (DL 5000/1000, Série EMIC 2). As amostras foram cortadas em tiras de 100 mm de comprimento por 25mm de largura e montadas verticalmente nas garras do equipamento, de modo que somente 50 mm da amostra foram submetidos ao efeito de tração. O ensaio foi realizado a uma velocidade de deslocamento de 5mm/min e força total de 5kN até a ruptura da amostra, cnforme determina a norma ASTM D882-83 (ASTM, 1996; MENEZES *et al.*, 2021).

Para obter a resistência à tração (nominal), foi necessário realizar a divisão da força máxima aplicada pela área da seção transversal original da amostra. O módulo de Young foi obtido como a inclinação da tensão versus deformação, obtida dividindo-se a resistência à tração (nominal) pela deformação da amostra. A resistência a tração (MPa) e a alongação na ruptura (%), foram obtidas utilizando as Equações 7 e 8, respectivamente (WARDAK *et al.*,

2024; QUEIROZ *et al.*, 2024).

$$TS(\text{MPa}) = L_p/S \times 10^{-2} \quad (7)$$

Onde:

L_p é a força (N) necessária para romper o filme;

S é a área da seção transversal do filme (m^2).

$$ER(\%) = \Delta L/L \times 100 \quad (8)$$

Onde:

ΔL é a mudança no comprimento (mm) do filme após a ruptura;

L é o comprimento inicial (mm) do filme.

3.3.6 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As microestruturas do filme foram avaliadas utilizando-se um microscópio eletrônico de varredura (TESCAN VEGA 3). Primeiramente, as amostras em pedaços pequenos de 1mm x 1mm foram fixadas em suporte de alumínio. Em seguida foram pulverizadas e recobertas com ouro (5nm) em metalizador à vácuo por 6 minutos a 20 mA (Quorum Tech Q150R), com o objetivo de conferir condutividade ao corpo de amostra. Em seguida o material foi fotografado em duas regiões distintas: na região onde ocorreu a ruptura, de forma transversal e na superfície do material. As imagens de alta resolução e de aspecto tridimensional tiveram como objetivo observar a homogeneidade, fraturas, porosidades e falhas. Os registros foram realizados na tensão de 20kV e ampliação de 500x.

3.4 Delineamento experimental do estudo de conservação pós-colheita da banana

As bananas cv. 'prata' (*M. acuminata* x *M. balbisiana*, AAB) foram colhidas na maturidade comercial na Fazenda Experimental Alagoinha, Mossoró/RN. Após a colheita foram selecionadas quanto ao peso, tamanho, cor uniforme; ausência de injúrias e doenças. E após revestimento em plástico bolha, para minimizar impactos e danos, essas foram acondicionadas em monobloco de PEBD, e transportadas sob temperatura ambiente ($25^\circ\text{C} \pm 2$) até o Laboratório de pós colheita do Centro de Engenharia da UFERSA (Mossoró/RN). No laboratório, as bananas foram higienizadas com solução de hipoclorito de sódio (200ppm) por 10 minutos e imediatamente imersos em solução de etileno (500ppm) também por 10 minutos, com o objetivo de uniformizar o amadurecimento das frutas. Em seguida, as bananas foram

separadas em cinco grupos, os quais receberam os tratamentos de revestimento biopolimérico.

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, em esquema fatorial 5x5, cinco tratamentos (T0: Banana sem revestimento (controle); T1: Banana com revestimento de alginato sem cera e óleo de baurrural (ALG85); T2: Banana com revestimento de alginato e óleo, sem cera (OEB10/ALG75); T3: Banana com revestimento de alginato, óleo de baurrural e cera (OEB10/CA30/ALG47); e T4: Banana com revestimento de alginato e cera sem óleo de baurrural (CA30/ALG57)), e cinco tempos de armazenamento (0+3, 5+3, 10+3, 15+3 e 20+3), com quatro repetições de dois frutos por tratamento.

Após o preparo das respectivas soluções filmogênica (T2 a T5), procedeu-se a aplicação pelo método de *dipping*, que consistiu em realizar imersão completa das frutas nas soluções de revestimento (ASIAMAH *et al.*, 2023). O procedimento foi realizado duas vezes, até completa cobertura da superfície das bananas.

Logo após a secagem em temperatura ambiente (26 °C), uma amostra foi analisada no tempo zero e as demais armazenadas em câmara fria (15±2°C e 60±2% UR) por 0, 5, 10, 15 e 20 dias, mais 3 dias de *shelf life* (23±2°C e 60±2% UR).

As seguintes características de qualidade foram avaliadas: perda de massa, aparência externa, coloração da casca, análise sensorial (análises não destrutivas e respiração, realizadas logo após a retirada dos frutos da câmara fria e ao final de cada *shelf life*); e as análises destrutivas, as quais foram realizadas apenas ao final do *shelf life*, foram: firmeza de polpa, amido, sólidos solúveis, acidez titulável.

3.4.1 Taxa de respiração

A taxa de respiração das bananas revestidas foi investigada por meio da metodologia adaptada de Menezes (2021) e Isermeyer (1952), que consiste na avaliação das taxas de liberação de CO₂ dos frutos. Neste estudo, a avaliação ocorreu a cada 5 dias, utilizando amostras com pesos variando entre 0,638 e 0,707 kg. As amostras foram colocadas em recipientes plásticos hermeticamente fechados durante duas horas, contendo 40 mL de NaOH (0,5 mol/L) para reter o CO₂ liberado pelos frutos. Ventoinhas foram adicionadas no interior de cada recipiente para melhorar a circulação do ar e aumentar a interação do CO₂ com o NaOH.

Após um período de 2 horas, os recipientes foram abertos e as placas contendo NaOH foram retiradas para a titulação com HCl (0,5 mol/L). Utilizou-se inicialmente 3 gotas de fenoftaleína como indicador, até a observação do ponto de viragem, registrando a quantidade de HCl utilizada. Em seguida, foi realizada uma nova titulação com 5 gotas de um indicador

misto (0,1% de verde de bromocresol e 0,1% de vermelho de metila), até se observar a mudança de cor do verde para vermelho, registrando também a quantidade de HCl utilizada. A taxa de respiração, expressa em CO₂ (mg/kg/h), foi possível utilizando a Equação 10.

$$mco_2(g) = (MMco_2 \cdot [HCl] \cdot fHCl \cdot Vmisto) - mCO_2 \quad (10)$$

No qual:

$MMco_2$ = massa molecular do CO₂ em gramas/mol;

$[HCl]$ = concentração de HCl em mol/L;

$fHCl$ = fator de correção do HCl;

$Vmisto$ = volume gasto de HCl usando o indicador misto;

mCO_2 = massa de CO₂ da prova em branco.

3.4.2 Avaliação das propriedades físicas das bananas

3.4.2.1 Perda de massa

A perda de massa das bananas foi avaliada conforme os métodos descritos por Yan *et al.* (2024) e Paiva (2020). O registro das massas perdidas foi realizado utilizando uma balança analítica Mars (modelo AY220, com precisão de 0,0001 g), após a retirada da câmara fria e novamente após 3 dias em temperatura ambiente. Para determinar os valores de perda de massa dos frutos, calculou-se a diferença entre a massa inicial e a massa após o armazenamento, expressando os resultados em porcentagem, de acordo com a Equação 11.

$$WL = \frac{im - fm}{im} \times 100 \quad (11)$$

Onde:

WL = perda de massa (%);

im = massa inicial (g);

fm = massa final (g).

3.4.2.2 Firmeza da polpa

A determinação da firmeza de polpa das bananas foi realizada conforme descrito por Wardak (2024). Utilizando um penetrômetro (modelo FT 327, McCormick, EUA) com ponta de 8 mm de diâmetro. As bananas foram perfuradas na região central, em 6 pontos para cada

tratamento. Os valores obtidos foram expressos em Newton (N).

3.4.2.3 Cor da casca

As modificações de coloração na casca do fruto foram registradas com o auxílio de um colorímetro Minolta (modelo CR-10, Konica Minolta, Japão). Os parâmetros investigados foram h (ângulo hue), b* (amarelo/azul) e L (luminosidade). As medições foram feitas em três pontos fixos e o resultado expresso pela média (YAN *et al.*, 2024).

Após a realização das análises físicas, as bananas foram processadas sem cascas, acondicionada em recipientes plásticos para a realização imediata das propriedades químicas.

3.4.3 Avaliação das propriedades químicas das bananas

3.4.3.1 Sólidos solúveis (SS)

As análises de sólidos solúveis foram determinadas de acordo com metodologia proposta por Yan *et al* (2024). Foi adicionado 1 mL de água destilada em 1 grama da banana processada e macerado com auxílio de um almofariz e pistilo de porcelana. O teor de sólidos solúveis (SS) foi analisado utilizando um refratômetro digital modelo (PR - 100 Palett, Atago, Japão), em triplicata e os valores foram expressos em °Brix.

3.4.3.2 Acidez titulável

Para a determinação da acidez titulável, seguiu-se metodologia empregada por PHAM *et al* (2023). Foram pesados 5 g de banana processada e misturados com 30 mL de água destilada em um béquer de 100 mL. A mistura foi agitada até se tornar homogênea e, em seguida, titulada com NaOH (0,1 mol/L) em duplicata. Durante a titulação, utilizou-se um medidor digital de pH (Tecnal modelo Tec-3MP) para monitorar o aumento do pH até atingir 8,1. Assim que esse valor foi alcançado, os volumes de NaOH consumidos foram registrados. Os resultado foram expressos em porcentagem de ácido málico.

3.4.3.3 Amido

Para determinação do amido, foi tulizada a metodologia adaptada de Soradech *et al.* (2017). Foi pesado 0,5 g de banana processada, em seguida, a banana foi colocada em balão e então o volume completado para 50 mL com água destilada. Com o auxílio de uma pipeta volumétrica de precisão, foram colocados 500 microlitros do material que estava no balão, mais 3 mL de cloreto de cálcio a 40% em um tubo de ensaio e levado para aquecimento em banho

maria a 100 °C durante 20 minutos. Após esfriar foram adicionados 3 mL de ácido acético 0,033 mol/L, 2 mL de solução de iodato/iodeto e 1,5 mL de água destilada nos tubos que foram retirados do aquecimento, e que continham a banana e o cloreto de cálcio. Com o auxílio de um equipamento espectrofotômetro configurado para o comprimento de onda de 700nm, utilizando-se uma curva padrão de amido previamente obtida no intervalo 0-100mg/L, os resultados foram expressos em porcentagem.

3.4.4 Avaliação sensorial

A avaliação sensorial foi realizada de forma visual por quatro provadores treinados, considerando diferentes tempos de armazenamento (0, 0+3, 5, 5+3, 10, 10+3, 15, 15+3, 20, 20+3), todos com idades entre 18 e 35 anos, no período da manhã, das 7h às 12h. Seis bananas de cada tratamento foram dispostas integralmente (com casca) em bandejas, que foram identificadas com códigos de três dígitos. Os padrões de *shelf life* foram avaliados por meio de um questionário (Anexo A). O objetivo da análise foi avaliar características como a aceitação comercial do consumidor, a presença de fungos e a adesividade do revestimento na fruta, utilizando uma escala hedônica. O estudo seguiu as orientações da NBR/ISO 11136/2016.

Os avaliadores foram instruídos a avaliar cada amostra utilizando o questionário de avaliação (Anexo A). A preferência dos consumidores foi identificada por meio de uma escala de quatro pontos (1 a 4), que descrevia os três atributos a serem analisados nas bananas: Aceitação: 1 = “Excelente (fresco)”, 2 = “Bom (desidratação leve, aparentemente fresco comerciável)”, 3 = “Aceitável (desidratação moderada. Comerciável)” e 4 = “Inaceitável (desidratação grave, enrugado, mofo)”. Ocorrência de fungo: 1 = “Excelente (ausência de fungo)”, 2 = “Bom (fungo leve afetando pequenas áreas do fruto)”, 3 = “Aceitável (fungo moderado afetando até duas áreas diferentes do fruto)” e 4 = “Inaceitável (fungo severo afetando mais de 50% do fruto)” Adesividade do filme: 1 = “Excelente (sem descamação)”, 2 = “Bom (leve descamação)”, 3 = “Aceitável (com descamação afetando pequenas áreas do fruto)” e 4 = “Inaceitável (com descamação intensa afetando mais 50% do fruto)”.

3.4.5 Ensaio in vitro para *Colletotrichum* sp e *Fusarium* sp

Para o teste antifúngico *in vitro* foi avaliado a ação do óleo essencial de baurburral na concentração de 200 µl/100mL para inibição dos fungos *Colletotrichum* sp. e *Fusarium* sp. Primeiramente os fungos foram obtidos da coleção do Laboratório de Microbiologia e Fitopatologia do Departamento de Ciências Agronômicas e Florestais da Universidade Federal

Rural do Semi-Árido.

Após a aquisição, antes de iniciar o ensaio, os fungos foram cultivados em meio de cultura tipo BDA (Batata Dextrose Agar) e mantidos em estufa tipo B.O.D. (Demanda Bioquímica de Oxigênio) por 7 dias para crescimento.

Após o crescimento, deu-se início ao ensaio onde foram vertidos o meio BDA (controle) e o meio BDA incorporado com o óleo essencial de bamburral em placas de Petri de 8 cm. Logo depois, foram retirados discos de 6 mm do crescimento micelial dos fungos e inseridos no centro de cada placa, com os respectivos tratamentos (DANIA; OLALEYE, 2022). Após a inserção, todas as placas foram levadas a estufa $\pm 28^{\circ}\text{C}$ por 7 dias. Em seguida, observou-se o crescimento do controle com o fundo cobrindo completamente a placa de petri até atingir a borda. Os dados obtidos no ensaio foram analisados através da medição radial do micélio, com o objetivo de determinar a porcentagem de inibição (% PIC) do fungo, conforme a Equação 12.

$$\% PIC = \frac{(Rc - Rt)}{Rc} \times 100 \quad (12)$$

Onde:

Rc = raio de crescimento do controle; Rt = raio de crescimento do tratamento.

3.5 Tratamento estatístico dos dados

Na análise dos dados dos filmes, o experimento seguiu um delineamento inteiramente casualizado, no qual cada um dos 7 tratamentos foi analisado em triplicata. A comparação de médias foi realizada utilizando ANOVA, com o teste de Tukey a um nível de significância de 5% ($P < 0,05$).

Quanto ao teste com o revestimento na banana, o delineamento também foi inteiramente casualizado, adotando um esquema fatorial 5x10. Os cinco tratamentos foram: T0: Banana sem revestimento (controle); T1: Banana com revestimento de alginato (ALG85); T2: Banana com revestimento de alginato e óleo essencial de bamburral (OEB10/ALG75); T3: Banana com revestimento de alginato, cera de abelha e óleo essencial de bamburral (OEB10/CA30/ALG47); e T4: Banana com revestimento de alginato, cera de abelha e óleo essencial de bamburral (CA30/ALG57), além de cinco tempos de armazenamento (0, 0+3, 5, 5+3, 10, 10+3, 15, 15+3, 20 e 20+3), com quatro repetições de dois frutos por tratamento.

A análise da respiração das frutas seguiu um delineamento similar, em esquema fatorial 5x5, no qual os mesmos tratamentos foram armazenados em refrigeração durante 24, 120, 240,

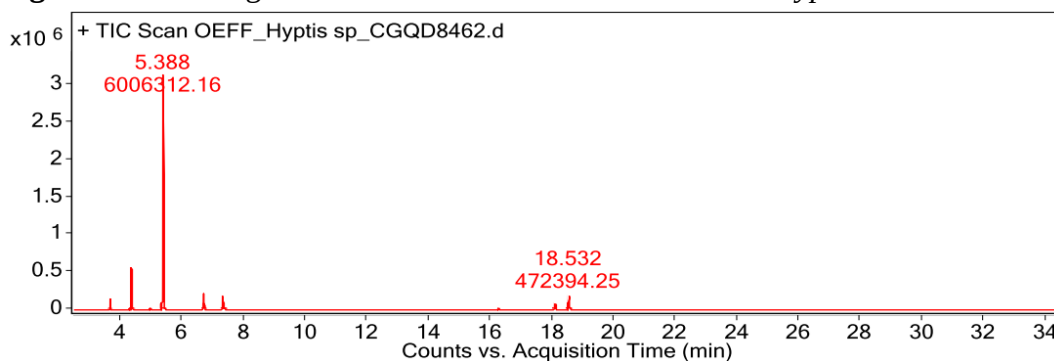
360 e 480 horas. Esse teste também foi realizado em triplicata, utilizando ANOVA de dois fatores e o teste de Tukey, com significância de 5%. Os dados obtidos nas análises dos filmes e na aplicação do revestimento foram tratados com o software Statistica 13.3 (Tibco Software Inc., EUA).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização do óleo essencial de Bamburral

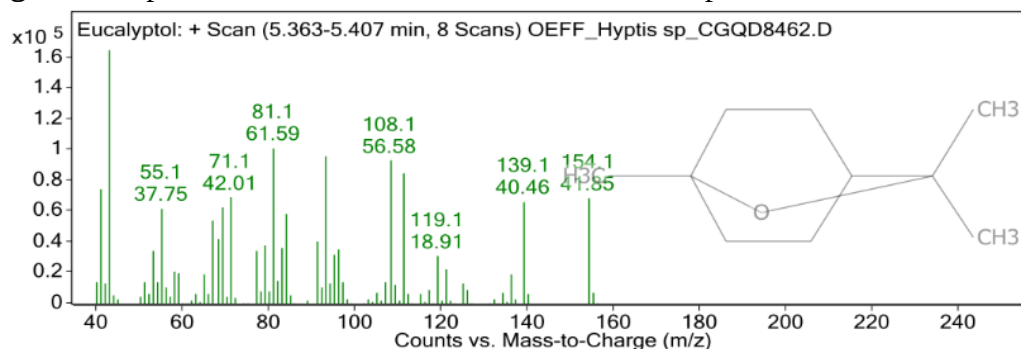
Os óleos essenciais extraídos das folhas de *Hyptis suaveolens*, obtidos no Parque Fuma Feia, foram denominados OEHSFF. O cromatograma do OEHSFF, apresentado na figura 7, exibiu dois picos principais: o primeiro, com tempo de retenção de 5,38 minutos, foi identificado como 1,8-cineol, com teor de 69,97%, enquanto o segundo pico, com tempo de retenção de 18,53 minutos, corresponde ao Sabineno, com teor de 10,16%. Os espectros de massa para o 1,8-cineol e o sabineno podem ser observados nas Figuras 8 e 9, respectivamente.

Figura 7. Cromatograma dos óleos essenciais das folhas de *Hyptis suaveolens*.



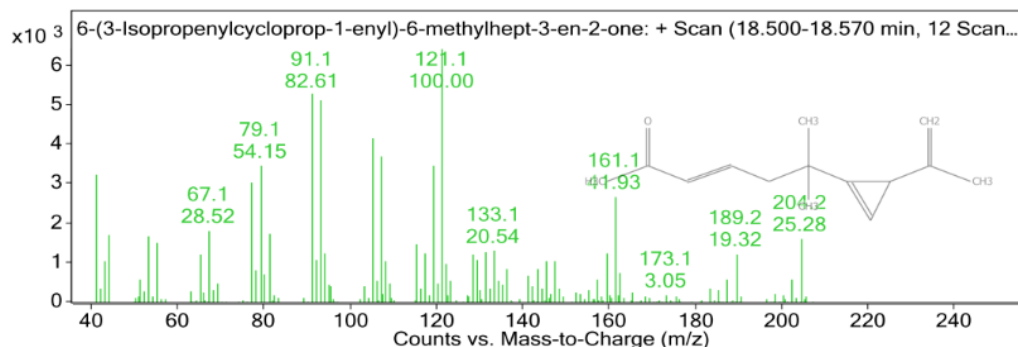
Fonte: Elaboração própria, 2024.

Figura 8. Espectro de massa do 1,8-cienol na GC-MS a partir OEHSFF.



Fonte: Elaboração própria, 2024.

Figura 9. Espectro de massa do Sabineno na GC-MS a partir OEHSFF.



Fonte: Autoria própria., 2024.

A partir da análise, todos os 7 constituintes referenciados foram identificados, totalizando um percentual de 100 %. Outros constituintes que merecem destaque pelo teor considerável são o γ -Curcumeno com 5,50 %, Fenchona 5,01 % e endo-Fenchol 4,82 %, conforme a Tabela 4.

Tabela 4. Composição Química dos óleos voláteis extraídos das folhas de *Hyptis suaveolens* coletados na zona de amortecimento do parque Fuma Feia (OEHSFF) com os IK corrigido (ADAMS, 2007).

Componente	IK Adams 2007	IK experimental	CGEM (%)
Triciclono	926	926	2,18
Sabineno	975	969	10,16
1,8-Cineol	1026	1022	69,97
Fenchona	1086	1080	5,01
endo-Fenchol	1116	1104	4,82
γ -Muuroleno	1479	1468	2,36
γ -Curcumeno	1482	1482	5,50
Total			100

Abreviaturas: IK, Índice de Kovats; CGEM, Cromatografia Gasosa acoplada à Espectrometria de Massas.

Fonte: Elaboração própria, 2024.

Os constituintes identificados no OEHSFF estão em consonância com pesquisas anteriores realizadas, nos quais o 1,8-Cineol foi predominante, apresentando semelhanças com a composição de espécimes do norte do Brasil (35,3%) e Índia (44,4%) (PENICHE *et al.*, 2022; TRIPATHI; UPADHYAY., 2009). Já o Sabineno foi relatado como majoritário em regiões como o Nordeste do Brasil (15,94%), Tailândia (25,4%) e Itália (34%) (BEZERRA *et al.*, 2017; NANTITANON; CHOWWANAPHOONPOHN; OKONOGLI, 2007; BENELLI *et al.*, 2012).

4.2 Características dos filmes biopoliméricos

4.2.1 Espessura, permeabilidade ao vapor de água e solubilidade

A espessura dos filmes é muito relevante para todas as propriedades físicas. Os valores médios das espessuras dos filmes produzidos ALG85; OEB10/ALG75; OEB10/CA30/ALG47; CA30/ALG57; e OEB5/CA15/ALG66 apresentaram diferenças significativas ao nível de 5% (Tabela 5). O filme ALG85 não se diferenciou dos filmes OEB10/ALG75, CA30/ALG57 e OEB5/CA15/ALG66, mas apresentou diferença em relação ao filme OEB10/CA30/ALG47, indicando que a maior concentração de óleo essencial e cera causou efeito na espessura do filme. O filme OEB10/ALG75 foi mais espesso do que os filmes OEB10/CA30/ALG47 e CA30/ALG57, sugerindo que a utilização apenas de óleo essencial e alginato resulta em espessuras menores em comparação com a adição de cera.

Os filmes elaborados com alginato de sódio puro são menos espessos devido à formação de estruturas mais densas e homogêneas (NEHCHIRI; AMIRI; RADI, 2021). Por outro lado, o aumento da espessura em filmes que contêm óleo essencial pode ser atribuído à interação deste óleo com a matriz polimérica, que provoca inchaço e alterações no arranjo das cadeias do biopolímero. Assim, à medida que o teor de óleo aumenta, a espessura do filme também se eleva (YAN *et al.*, 2024). Ademais, estudos anteriores indicam que a concentração de cera está diretamente relacionada à espessura dos filmes, uma vez que o aumento dessa concentração resulta em filmes mais espessos (HOSSEINI *et al.*, 2023). Esse incremento na espessura é ainda mais acentuado quando se utiliza o método de deposição, sendo essa variação principalmente influenciada pelo número de moléculas hidrofóbicas depositadas (TEDESCHI *et al.*, 2018).

Em relação a taxa de permeabilidade ao vapor de água (TPVA) e permeabilidade ao vapor de água (PVA). O filme OEB5/CA15/ALG66 apresentou as maiores médias, $236,32 \pm 17,91$ g/h.m² e $141,38 \pm 12,23$ g.mm/kPa.m², no entanto, os filmes OEB10/CA30/ALG47 apresentou a menor média, para TPVA, $104,88 \pm 5,20$ g/h.m² e PVA, $69,63 \pm 8,42$ g.mm/kPa.m² (Tabela 5).

De modo geral, a adição de cera de abelha e óleo essencial em concentrações mais altas reduz as taxas de TPVA e PVA. Esse resultado está em consonância com as análises das microfotografias eletrônicas (Figura 10). Essa diminuição se deve à incorporação do óleo, que torna a superfície do filme áspera e compacta, criando caminhos tortuosos para a difusão de água. Além disso, essa redução está associada à formação de uma rede lipídica interconectada na matriz do filme (WARDAK *et al.*, 2021). Relacionando a cera de abelha, seu aumento de concentração leva a um maior acúmulo de gotículas de óleo, comprometendo a estrutura da

rede de hidrogel. Essa alteração está ligada à natureza hidrofóbica da cera, que também favorece a criação de caminhos tortuosos para a difusão de água na matriz do filme (HOSSEINI *et al.*, 2023).

Para a solubilidade, o filme OEB10/CA30/ALG47 obteve a menor média $46,98 \pm 2,84$ e apresentou diferença estatística com os demais tratamentos. Contudo os filmes ALG85 e OEB10/ALG75 não apresentaram diferença estatística entre si e obtiveram as maiores médias, $77,96 \pm 3,84$ e $74,65 \pm 3,2$, respectivamente, apresentando a maior solubilidade e consequentemente uma menor resistência à água. Os valores obtidos foram próximos dos encontrados por Queiroz *et al.* (2025), onde o alginato de sódio puro apresentou os maiores valores de solubilidade de $79,88 \pm 0,17$. Assim, a adição de compostos hidrofóbicos, como a cera de abelha e o óleo essencial, diminui a solubilidade do filme em água. Quando a esses materiais são incorporados, podem se fixar na matriz do filme de alginato dificultando a sua solubilização pela água (VERGARA *et al.*, 2020).

Tabela 5. Espessura, TPVA, PVA e solubilidade dos filmes de alginato, cera de abelha e óleo essencial de baurburral.

Tratamentos	Espessura (mm)	TPVA (g/h.m ²)	PVA (g.mm/kPa.m ²)	Solubilidade (%)
ALG85	$0,0810 \pm 0,005^{bcd}$	$129,46 \pm 9,91^b$	$82,37 \pm 4,71^b$	$77,96 \pm 3,84^a$
OEB10/ALG75	$0,0770 \pm 0,012^d$	$130,69 \pm 8,00^b$	$70,59 \pm 9,53^{bc}$	$74,65 \pm 3,2^a$
OEB10/CA30/ALG47	$0,1035 \pm 0,003^a$	$104,88 \pm 5,20^c$	$69,63 \pm 8,42^c$	$46,98 \pm 2,84^d$
CA30/ALG57	$0,1020 \pm 0,010^{ab}$	$122,58 \pm 17,95^b$	$93,11 \pm 11,34^b$	$64,93 \pm 3,91^{bc}$
OEB5/CA15/ALG66	$0,0815 \pm 0,009^{cd}$	$202,32 \pm 23,51^a$	$144,57 \pm 14,51^a$	$62,87 \pm 3,88^{bc}$
OEB5/CA15/ALG66	$0,0805 \pm 0,005^{cd}$	$236,32 \pm 17,91^a$	$141,38 \pm 12,23^a$	$60,80 \pm 3,19^c$
OEB5/CA15/ALG66	$0,0845 \pm 0,002^{bcd}$	$201,51 \pm 16,83^a$	$128,49 \pm 9,20^a$	$66,41 \pm 2,85^b$

Os resultados são expressos como média $\pm$ desvio padrão. Letras diferentes na linha indicam diferença estatística entre os tratamentos. Todas as comparações foram realizadas pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$). ALG85 (alginato de sódio 85%); OEB10/ALG75 (óleo essencial de baurburral 10% com alginato de sódio 75%); OEB10/CA30/ALG47 (óleo essencial de baurburral 10%, cera de abelha 30% com alginato de sódio 47%), CA30/ALG57 (cera de abelha 30% com alginato de sódio 57%); OEB5/CA15/ALG66 (óleo essencial de baurburral 5%, cera de abelha 15% e alginato de sódio 66%).

Abreviaturas: TPVA, taxa de permeabilidade ao vapor de água; PVA, permeabilidade ao vapor de água.

Fonte: Elaboração própria, 2024.

4.2.2 Cor e opacidade

As propriedades ópticas dos filmes de embalagem são importantes em termos de aparência geral, aceitação do consumidor e também visualização do produto. Os resultados dos filmes para as coordenadas de cor (a^* , b^* e L) e opacidade podem ser observados na Tabela 6. Na avaliação de cor, o parâmetro a^* , que representa o eixo verde/vermelho, foi observado que não houve diferença estatística entre os tratamentos. Assim, a adição de cera e óleo essencial

não alterou significativamente a níveis de vermelho/verde dos filmes.

O parâmetro b^* , que indica a coloração entre amarelo e azul, apresentou o menor valor para o filme OEB10/ALG75, com média de $14,78 \pm 0,40$. No entanto, esse valor não diferiu estatisticamente do filme ALG85. Dessa forma, os filmes T2 e T1 exibiram uma coloração amarela levemente inferior à dos filmes OEB10/CA30/ALG47, CA30/ALG57 e OEB5/CA15/ALG66, que continham cera de abelha. A quantidade de cera afetou o parâmetro b^* , o que está em consonância com estudos anteriores. Tedeschi *et al.* (2018) investigaram diferentes concentrações de cera de abelha (0, 5, 15 e 30%) combinadas com alginato de sódio, observando que a cor amarela aumentava devido à presença da cera. Essa cor ocorre principalmente devido à presença de substâncias como mel, pólen e própolis que se misturam com a cera na comeia (FELICOLI *et al.*, 2019).

Na análise do parâmetro L (luminosidade), os filmes ALG85 e OEB10/ALG75 apresentaram as maiores médias, de $76,82 \pm 0,13$ e $76,52 \pm 0,67$, respectivamente, sem diferença estatística entre eles (Tabela 6). Os filmes OEB10/CA30/ALG47, CA30/ALG57 e OEB5/CA15/ALG66 também não mostraram diferenças estatísticas entre si. De forma geral, observou-se uma maior luminosidade para os filmes que continham somente alginato e óleo essencial. Por outro lado, foi observada uma redução na luminosidade com a adição de cera, resultando em tons mais escuros. Contudo, não houve diminuição no valor de L com o aumento da concentração de cera, corroborando com Oliveira *et al.* (2018).

Na avaliação da opacidade (Tabela 6), quanto menor o valor de opacidade, maior a transparência dos filmes. Apesar do óleo essencial de bamburral apresentar uma coloração amarelo claro (Poonkodi *et al.*, 2017), os filmes ALG85 e OEB10/ALG75 apresentaram média similares, $19,82 \pm 3,41$ e $22,17 \pm 2,01$, respectivamente, e não houve diferença estatística entre si. Sendo assim, o óleo essencial não afetou a opacidade do filme. Entretanto, os filmes CA30/ALG57 e OEB5/CA15/ALG66, que continham cera e alginato, demonstraram resultados semelhantes entre si, com médias de $22,21 \pm 2,99$ e $19,55 \pm 1,13$, respectivamente. O filme OEB10/CA30/ALG47, apresentou diferença significativa em relação a todas as outras composições. A opacidade do filme aumentou com a adição de cera de abelha devido à dispersão da luz causada pela cera. As diferenças no índice de refração entre a cera e o biopolímero criam múltiplas interfaces que refletem e refratam a luz. Além disso, as interações físicas resultantes da mistura podem gerar desordem na matriz do filme, reduzindo a transmissão de luz e contribuindo para a sua aparência mais opaca (OLIVEIRA *et al.*, 2018). Resultados semelhantes foram observados em pesquisas anteriores (ZHANG; SIMPSON;

DUMONT, 2018; LIU *et al.*, 2022).

Tabela 6. Parâmetros de cor e opacidade dos filmes de alginato, cera de abelha e óleo essencial de baurburral.

Tratamentos	a*	b*	L	Opacidade
ALG85	6,66±1,96 ^{ab}	15,86±0,87 ^{bc}	76,82±0,13 ^a	19,82±3,41 ^a
OEB10/ALG75	5,48±0,59 ^b	14,78±0,40 ^c	76,52±0,67 ^a	22,17±2,01 ^a
OEB10/CA30/ALG47	5,82±1,39 ^b	18,70±0,35 ^{ab}	75,54±0,06 ^b	23,66±1,71 ^d
CA30/ALG57	5,58±1,11 ^b	19,78±0,36 ^a	74,98±0,13 ^b	22,21±2,99 ^{bc}
OEB5/CA15/ALG66	5,24±1,89 ^b	19,94±0,76 ^a	75,04±0,28 ^b	19,55±1,13 ^{bc}
OEB5/CA15/ALG66	5,54±2,97 ^b	20,66±0,74 ^a	75,42±0,13 ^b	24,12±2,14 ^c
OEB5/CA15/ALG66	5,30±1,40 ^b	19,08±0,19 ^{ab}	75,10±0,19 ^b	25,27±1,61 ^b

Os resultados são expressos como média ± desvio padrão. Letras diferentes na linha indicam diferença estatística entre os tratamentos. Todos as comparações foram realizadas pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$). ALG85 (alginato de sódio 85%); OEB10/ALG75 (óleo essencial de baurburral 10% com alginato de sódio 75%); OEB10/CA30/ALG47 (óleo essencial de baurburral 10%, cera de abelha 30% com alginato de sódio 47%), CA30/ALG57 (cera de abelha 30% com alginato de sódio 57%); OEB5/CA15/ALG66 (óleo essencial de baurburral 5%, cera de abelha 15% e alginato de sódio 66%).

Fonte: Autoria própria, 2024.

4.2.3 Microestruturas de superfície

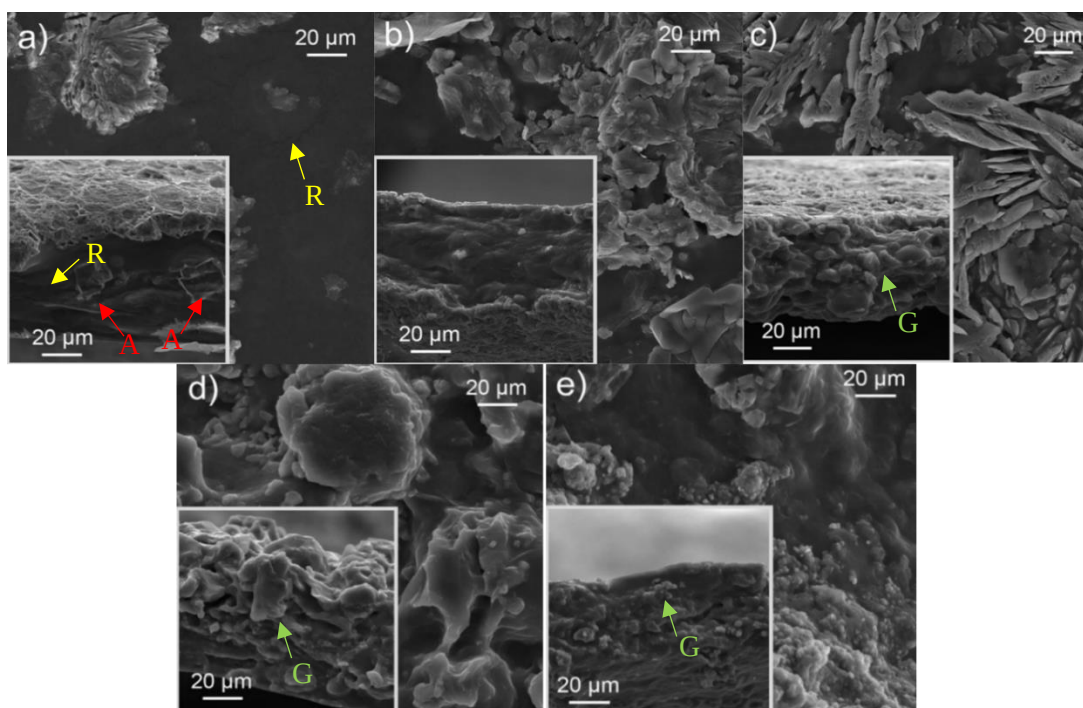
As micrografias eletrônicas de varredura da seção transversal e da superfície dos filmes AG são apresentadas na Figura 10. O filme ALG85 (Figura 7a) mostrou irregularidades, como acúmulos de alginato e pequenas rachaduras em áreas específicas. No entanto, apesar desses acúmulos, a superfície do filme foi, em geral, mais lisa e homogênea do que a dos outros filmes. As rachaduras pequenas e descontínuas podem ser atribuídas a fenômenos de encolhimento que ocorreram durante a secagem, um resultado também observado em estudos anteriores (NEHCHIRI; AMIRI; RADI, 2021; AMADO; SILVA; MAURO, 2023; WARDAK *et al.*, 2024).

As imagens do filme OEB10/ALG75 (Figura 10b) revelam uma superfície áspera e uma distribuição homogênea e com densidade. Nehchiri, Amiri e Radi (2021) que obtiveram resultados similares ao utilizar alginato de sódio e óleo essencial, sugeriram que o aprisionamento dos ácidos graxos na matriz polissacarídica durante a secagem promove uma adesão adequada para a camada lipídica.

A imagem do filme OEB10/CA30/ALG47 (Figura 10c) mostrou que a estrutura superficial do filme foi irregular, granulada e áspera. Isso pode ter ocorrido por causa a hidrofobicidade dos oleogéis, que formaram aglomerados hidrofóbicos na matriz hidrocolóide original, resultando em mistura irregular da fase aquosa e da fase oleosa (XUE; HUANG, 2024). O filme OEB10/ALG75 (Figura 10d) também exibiu estrutura superficial irregular, com

grânulos mais aparentes. No entanto, o filme OEB5/CA15/ALG66 (Figura 10e) também mostrou uma estrutura superficial semelhante com a do filme OEB10/CA30/ALG47, irregular, porém com grânulos menores e áspera.

Figura 10. Micrografias das superfícies/transversal dos filmes: Magnitude = 2000x, tensão de aceleração = 20 kV, distância das lentes = 8,11 a 12,49 mm, tipo de sinal = elétrons secundários.



Legenda: ALG85 (a). OEB10/ALG75 (b). OEB10/CA30/ALG47 (c). CA30/ALG57 (d). e OEB5/CA15/ALG66 (e); A – aglomerados; G – grânulos; R – rachadura;

Fonte: Elaboração própria, 2024.

4.2.4 Propriedades mecânicas

As propriedades mecânicas, incluindo resistência à tração, alongamento na ruptura e módulo de Young (módulo de elasticidade), são parâmetros fundamentais para descrever o comportamento mecânico de filmes e caracterizar sua estrutura interna. As propriedades mecânicas dos filmes estão ilustradas na Tabela 7.

Os filmes T1 (ALG85) e T2 (OEB10/ALG75) não mostraram diferenças estatísticas e tiveram os maiores valores de resistências à tração, $1,42 \pm 0,02$ e $1,60 \pm 0,15$, respectivamente. Portanto, a concentração de óleo essencial utilizada não afetou esse parâmetro. Em contrapartida, os filmes que continham cera de abelha, T3 (OEB10/CA30/ALG47), T4 (CA30/ALG57) e T5 (OEB5/CA15/ALG66), apresentaram as menores resistências à tração, com valores de $0,38 \pm 0,04$, $0,21 \pm 0,01$ e $0,36 \pm 0,01$, respectivamente. Em relação aos filmes com adição de cera, não houve diferenças estatísticas entre si.

Tratando-se do alongamento na ruptura, os filmes T1 (ALG85) e T2 (OEB10/ALG75),

que não continham cera de abelha, apresentaram os maiores valores de alongamento, medindo $48,56 \pm 1,15$ e $47,92 \pm 0,95$, respectivamente. Observou-se também que os filmes T3 (OEB10/CA30/ALG47) e T5 (OEB5/CA15/ALG66), que continham cera de abelha juntamente com óleo essencial, não mostraram diferenças estatísticas significativas. Além disso, os filmes T3 (OEB10/CA30/ALG47) e T4 (CA30/ALG57), ambos com 30% de cera de abelha, também não apresentaram diferenças estatísticas entre si.

Referente ao módulo de Young, os filmes com adição de cera de abelha, T3 (OEB10/CA30/ALG47), T4 (CA30/ALG57) e T5 (OEB5/CA15/ALG66), apresentaram os menores valores, com resultados de $1,29 \pm 0,05$ MPa, $1,15 \pm 0,04$ MPa e $0,96 \pm 0,03$ MPa, respectivamente. No entanto, os filmes T1 (ALG85) e T2 (OEB10/ALG75) obtiveram os maiores valores, com medidas de $2,69 \pm 0,03$ MPa e $3,92 \pm 0,16$ MPa, respectivamente.

O módulo de elasticidade observado no filme contendo apenas alginato e óleo essencial pode ser explicado pela ação do óleo, que também atua como plastificante, aumentando a mobilidade das cadeias poliméricas, bem como a extensibilidade e flexibilidade dos filmes (MAHCENE *et al.*, 2020).

Em relação à redução da resistência à tração, do alongamento à ruptura e do módulo de elasticidade nos filmes com cera de abelha, estudo realizado por Queiroz, Aroucha e Leite (2025) sugere que a adição desse componente altera a estrutura interna e as propriedades mecânicas do filme. As rugosidades observadas nas microfotografias eletrônicas de varredura (MEV) desempenham um papel importante na concentração de tensões e fragilizam o material. Além disso, as partículas maiores dispersas podem afetar a matriz, criando barreiras que enfraquecem a rede tridimensional do alginato.

Tabela 7. Propriedades mecânicas dos filmes de alginato, cera de abelha e óleo essencial de bamburral.

Tratamentos	Resistência à Tração (MPa)	Alongamento à ruptura (%)	Módulo de Young (MPa)
ALG85	$1,42 \pm 0,02^b$	$48,56 \pm 1,15^a$	$2,69 \pm 0,03^b$
OEB10/ALG75	$1,60 \pm 0,15^a$	$47,92 \pm 0,95^a$	$3,92 \pm 0,16^a$
OEB10/CA30/ALG47	$0,38 \pm 0,04^{de}$	$24,73 \pm 3,66^{bc}$	$1,29 \pm 0,05^d$
CA30/ALG57	$0,21 \pm 0,01^e$	$25,10 \pm 0,19^c$	$1,15 \pm 0,04^d$
OEB5/CA15/ALG66	$0,36 \pm 0,01^e$	$37,42 \pm 0,97^{ab}$	$0,96 \pm 0,03^e$
OEB5/CA15/ALG66	$0,59 \pm 0,00^c$	$23,32 \pm 0,02^{bc}$	$1,27 \pm 0,00^c$
OEB5/CA15/ALG66	$0,56 \pm 0,00^{cd}$	$27,34 \pm 0,19^{bc}$	$1,07 \pm 0,02^c$

Os resultados são expressos como média $\pm$ desvio padrão. Letras diferentes na linha indicam diferença estatística entre os tratamentos. Todas as comparações foram realizadas pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$). ALG85 (alginato de sódio 85%); OEB10/ALG75 (óleo essencial de bamburral 10% com alginato de sódio 75%);

OEB10/CA30/ALG47 (óleo essencial de baurburral 10%, cera de abelha 30% com alginato de sódio 47%), CA30/ALG57 (cera de abelha 30% com alginato de sódio 57%); OEB5/CA15/ALG66 (óleo essencial de baurburral 5%, cera de abelha 15% e alginato de sódio 66%).

Fonte: Elaboração própria, 2024.

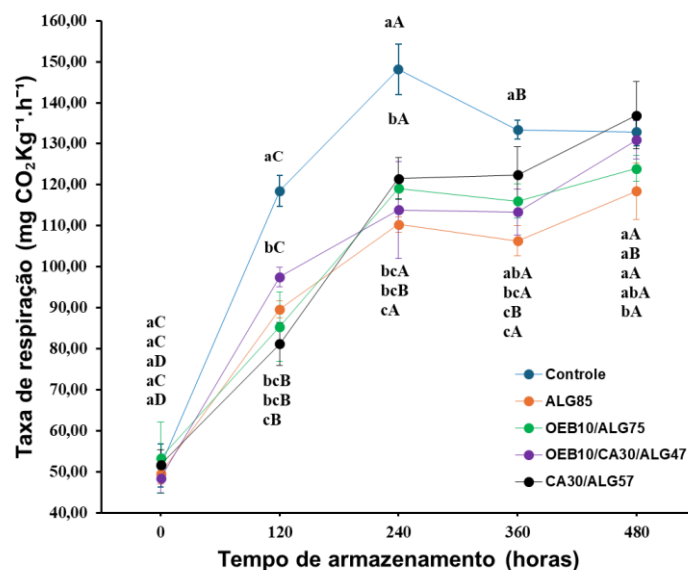
4.3 Avaliação pós-colheita da banana com revestimento biopolimérico

Conforme descrito no item 3.6, as frutas selecionadas foram submetidas ao recobrimento por *dipping* com os revestimentos T0 (controle), T1 (ALG85), T2 (OEB10/ALG75), T3 (OEB10/CA30/ALG47) e T4 (CA30/ALG57). As frutas foram armazenadas em condições controladas de temperatura e umidade, a 15 °C para refrigeração e a 23 °C para *shelf life*. Os próximos tópicos apresentarão os resultados obtidos em relação às respostas físicas, químicas e fisiológicas das frutas, influenciadas pelos diferentes tratamentos, assim como pelo tempo e temperatura de armazenamento.

4.3.1 Taxa de respiração

A Figura 11, mostra influência significativa dos revestimentos na taxa de respiração dos frutos. Independente do tratamento, houve acréscimo da taxa de respiração dos frutos durante o período de armazenamento. Tal evento é normal no processo de amadurecimento de frutos climatéricos (CHITARRA; CHITARRA, 2005). Não obstante, os frutos com revestimento apresentaram um retardo significativo na taxa de respiração, tal observação pode-se verificar já nas primeiras 120 horas, com a maior taxa de respiração observada nos frutos controle (sem revestimento), de (118,53 mg CO₂/kg.h), quando comparado aos frutos revestidos com ALG85, OEB10/ALG75 e CA30/ALG57, cujos valores foram, 89,68 mg CO₂/kg.h, 85,38 mg CO₂/kg.h e 81,19 mg CO₂/kg.h, respectivamente. Indicando que os revestimentos apresentaram-se como boas barreiras a gases e assim foram efetivos em diminuir a taxa de respiração. De mesmo modo, estudos anteriores com revestimentos em bananas, evidenciaram que a cobertura propiciou barreira a gases (O₂ e CO₂), e diminuiu a taxa de respiração (NGUYEN *et al.*, 2021; YAN *et al.*, 2024).

Figura 11. Taxa de respiração para bananas cv. prata até 20 dias de armazenamento.



Legenda: Taxa de respiração (%) de frutos de banana cv. prata revestidas com diferentes revestimentos em função do período de armazenamento a $15 \pm 2^\circ\text{C}$ e $60\% \pm 2\%$ UR. Cada ponto de dados representa a média $\pm$ desvio padrão. Barras verticais representam o desvio padrão das médias de três repetições. Letras minúsculas diferentes indicam uma diferença estatística significativa entre os tratamentos no mesmo tempo de armazenamento pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Letras maiúsculas diferentes indicam uma diferença estatisticamente significativa entre os dias de armazenamento no mesmo tratamento pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Fonte: Elaboração própria, 2024.

Por outro lado, após 240 horas sob refrigeração, foi possível identificar o comportamento climatérico dos frutos. O controle destacou-se com valores elevados, variando de 148,20 a 252,58 mg CO₂/kg.h, apresentando uma diminuição subsequente após 360 horas, estabilizando em 132,91 mg CO₂/kg.h, sem diferenças estatísticas em relação aos demais tratamentos. Nos frutos revestidos, o pico de respiração também ocorreu após 240 horas, seguido de uma leve queda em 360 horas. Os revestimentos que não continham cera de abelha, ALG85 e OEB10/ALG75, não mostraram diferenças estatísticas entre si. Também foi possível observar significativa diferença entre os valores dos revestimentos ALG85 e CA30/ALG57, nos tempos de 120h, 240h, 360h e 480h, demonstrando que a adição da cera, em altas concentrações pode afetar diretamente a respiração do fruto, devido principalmente à formação de uma estrutura de revestimento com superfície irregular, granulada e áspera, como observado nas micrografias.

De acordo com a literatura, uma taxa elevada de respiração está associada à deterioração mais rápida da qualidade de bananas. O pico de respiração, conhecido como "máximo climatérico", é seguido por um período de declínio na atividade respiratória, denominado estágio pós-climatérico (CHITARRA; CHITARRA, 2005; MURMU; MISHRA, 2018). No que abrange desde o pico até a estabilização pós-

climatérica, os revestimentos ALG85 e OEB10/ALG75 mostraram-se mais estáveis ao longo do experimento.

4.3.2 Avaliação das características físicas das bananas

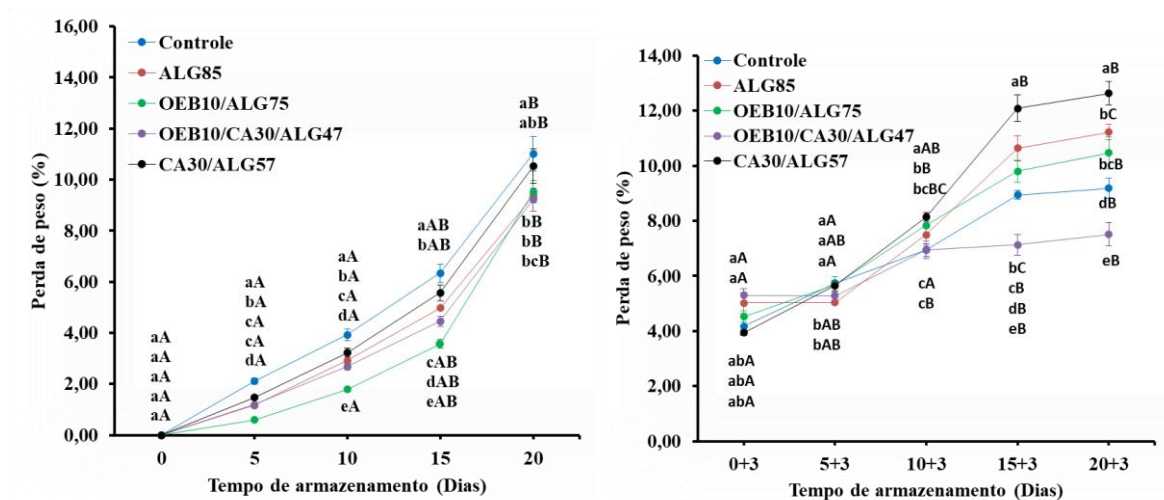
4.3.2.1 Perda de massa

Na avaliação de perda de massa, o controle (sem revestimento) apresentou uma perda significativamente maior (Figura 12), evidenciando a eficácia dos tratamentos de revestimento na mitigação dessa perda. A diferença de 2,11% em comparação a apenas 3,93% nos frutos revestidos após 10 dias de armazenamento demonstra que os revestimentos funcionam como barreiras contra a desidratação, um fator crucial para a manutenção da qualidade do fruto. Esses resultados estão em concordância com estudos realizados com banana (NGUYEN *et al.*, 2021; YAN *et al.*, 2024).

Adicionalmente, o tratamento OEB10/ALG75 se destacou como o mais eficaz, evidenciando a relevância da composição do revestimento na performance de conservação. A eficácia dos revestimentos pode estar relacionada à sua capacidade de criar um microambiente que retém a umidade e limita a troca gasosa, fatores que influenciam diretamente a perda de massa e, consequentemente, a qualidade do fruto ao longo do tempo (BENITEZ *et al.*, 2022).

Embora CA30/ALG57 e ALG85 também apresentassem perdas consideráveis, suas performances foram inferiores ao OEB10/ALG75, o que sugere que a combinação de materiais e suas proporções podem impactar diretamente a eficácia do revestimento. A constatação de que, no dia 20, a única diferença significativa ocorreu entre ALG85 e CA30/ALG57, sem distinção entre os revestimentos aplicados, sugere um ponto de saturação na eficácia dos revestimentos, onde todos demonstraram uma capacidade similar de proteção após um período de armazenamento.

Figura 12. Perda de massa (%) para bananas cv. Prata.



Legenda: Perda de massa (%) de frutos de banana cv. prata revestidas com diferentes revestimentos em função do período de armazenamento a $15 \pm 2^\circ\text{C}$ e $60\% \pm 2\%$ UR (a) e $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e $60\% \pm 2\%$ UR (b). Cada ponto de dados representa a média $\pm$ desvio padrão. Barras verticais representam o desvio padrão das médias de três repetições. Letras minúsculas diferentes indicam uma diferença estatística significativa entre os tratamentos no mesmo tempo de armazenamento pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Letras maiúsculas diferentes indicam uma diferença estatisticamente significativa entre os dias de armazenamento no mesmo tratamento pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Fonte: Elaboração própria, 2024.

A análise dos resultados do experimento de avaliação de *shelf life* indicou diferenças significativas nas perdas de peso dos frutos sob condições controladas de temperatura $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ e umidade $60\% \pm 2\%$ (Figura 13). No intervalo de 0+3 dias, os tratamentos não mostraram diferenças estatísticas, sugerindo que, neste período inicial, todos os frutos estavam sob condições similares de deterioração. Entretanto, a partir de 15+3 dias, os resultados começaram a evidenciar a eficácia dos tratamentos aplicados. O tratamento controle (T0) apresentou a maior perda de peso, 11,82%, o que é consistente com a literatura, que indica que frutos não revestidos tendem a deteriorar-se mais rapidamente (PAIVA *et al*, 2020; NGUYEN *et al.*, 2021; YAN *et al.*, 2024).

Os tratamentos ALG85, OEB10/ALG75 e CA30/ALG57 apresentaram perdas de massa que variaram de 8,94% a 10,64%, o que sugere que esses tratamentos ofereceram alguma proteção, mas não foram os mais eficazes. Em contraste, o tratamento OEB10/CA30/ALG47 destacou-se com a menor perda de massa (7,14%), o que pode indicar que a combinação de componentes deste tratamento proporciona uma melhor preservação das características fisiológicas dos frutos. De acordo com Queiroz, Aroucha e Leite (2025), a combinação de diferentes agentes de revestimento, como alginato, cera de abelha e óleo essencial pode criar uma barreira eficaz que reduz a perda de água. Os pesquisadores relataram uma perda 12,87% nas frutas controle e somente 6,79% nas frutas revestidas com cera de abelha e alginato de sódio.

No intervalo de 20+3 dias, houve diferença significativa nas perdas de massa entre ALG85 e CA30/ALG57 (Figura 13), indicando que o tempo de armazenamento foi um fator importante. A proteção conferida por esses tratamentos parece diminuir com o prolongamento do armazenamento, corroborando com a ideia de que os agentes de revestimento podem ter eficácia limitada ao longo do tempo (HOSSEINI; MOUSAVI; MCCLEMENTS, 2023; DENG *et al.*, 2024; YU *et al.*, 2024).

4.3.2.2 Firmeza

A análise da firmeza é um parâmetro fundamental de qualidade durante a comercialização de frutos. Nesse contexto, é importante avaliar o efeito dos revestimentos na conservação dessa característica ao longo do tempo, principalmente sob condições de temperatura ambiente. De acordo com os resultados apresentados na Figura 14, os frutos sem revestimento mostraram uma redução acentuada na firmeza, com a medida de 24,6 N no tempo inicial (0) caindo para 7,7 N após 3 dias (0+3). Esta diminuição é expressiva e sugere que a falta de revestimento acelera a perda de firmeza, o que é um indicativo de que fatores como a perda de água, atividade enzimática e degradação das paredes celulares estão ocorrendo de forma mais acelerada nesse tratamento (REN *et al.*, 2020; YAN *et al.*, 2024).

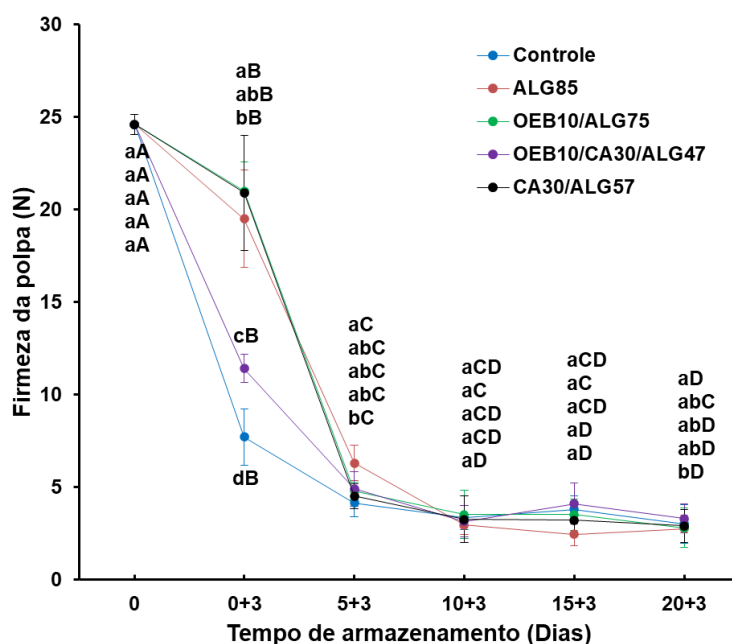
Por outro lado, os frutos tratados com revestimentos, como os compostos de T2 (OEB10/ALG75), T4 (CA30/ALG57) e T1 (ALG85), apresentaram uma conservação maior de firmeza, com valores de 21 N, 20,9 N e 19,5 N, respectivamente. Esses resultados são consistentes com estudos anteriores (DENG *et al.*, 2024; YU *et al.*, 2024; XUE; HUANG., 2024), os quais demonstraram que o uso de revestimentos comestíveis pode atuar como uma barreira física, reduzindo a evaporação da água e retardando a ação de enzimas responsáveis pela degradação da textura dos frutos.

A análise estatística revelou uma diferença significativa apenas entre os tratamentos nos intervalos de 0 (24,6 N) a 0+3 (7,7 N). Sendo assim, nesse período, os efeitos do revestimento na conservação da firmeza foram mais perceptíveis. A ausência de diferenças nos intervalos posteriores (5+3, 10+3, 15+3 e 20+3) sugere que, após 3 dias, os efeitos dos revestimentos se estabilizam e, possivelmente, atingiram um ponto de equilíbrio na conservação da textura dos frutos. Esse comportamento pode ser explicativo de uma dinâmica onde o revestimento mantém sua função protetora inicial, mas a deterioração dos frutos, embora mais lenta, continua em um ritmo constante após certo tempo (ZHANG *et al.*, 2024).

Além disso, é importante destacar que a composição do revestimento parece influenciar

diretamente o desempenho na preservação da firmeza. Tratamentos com diferentes combinações de compostos como alginato (ALG) e compostos adicionais como OEB e CA mostraram desempenhos variados, sugerindo que a formulação do filme pode ser otimizada para maximizar a eficácia no controle da perda de firmeza. A combinação de alginato com ácidos orgânicos ou outros polissacarídeos tem sido reportada como eficaz na preservação de frutos, pois pode melhorar a formação de uma rede mais coesa e robusta que auxilia na redução da taxa de transpiração e retarda a ação de microrganismos patogênicos (MAHCENE *et al.*, 2020; XUE; HUANG, 2024; YAN *et al.*, 2024; QUEIROZ; AROUCHA; LEITE, 2025).

Figura 13. Firmeza (N) para bananas cv. prata até 20+3 dias de armazenamento em temperatura ambiente de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ (shelf life).



Legenda: Perda de massa (%) de frutos de banana cv. prata revestidas com diferentes revestimentos em função do período de armazenamento a $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e $60\% \pm 2\%$ UR. Cada ponto de dados representa a média $\pm$ desvio padrão. Barras verticais representam o desvio padrão das médias de três repetições. Letras minúsculas diferentes indicam uma diferença estatística significativa entre os tratamentos no mesmo tempo de armazenamento pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Letras maiúsculas diferentes indicam uma diferença estatisticamente significativa entre os dias de armazenamento no mesmo tratamento pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Fonte: Elaboração própria, 2024.

4.3.2.3 Cor da casca

A coloração é um indicador importante de qualidade e maturidade de alimentos, principalmente em frutas, sendo facilmente visualizada pelo consumidor. No caso da banana, a casca muda de verde para amarelo ao longo do amadurecimento, com manchas marrons surgindo no estágio final. Essa transformação visual auxilia na avaliação do estado de

conservação (YAN *et al.*, 2024).

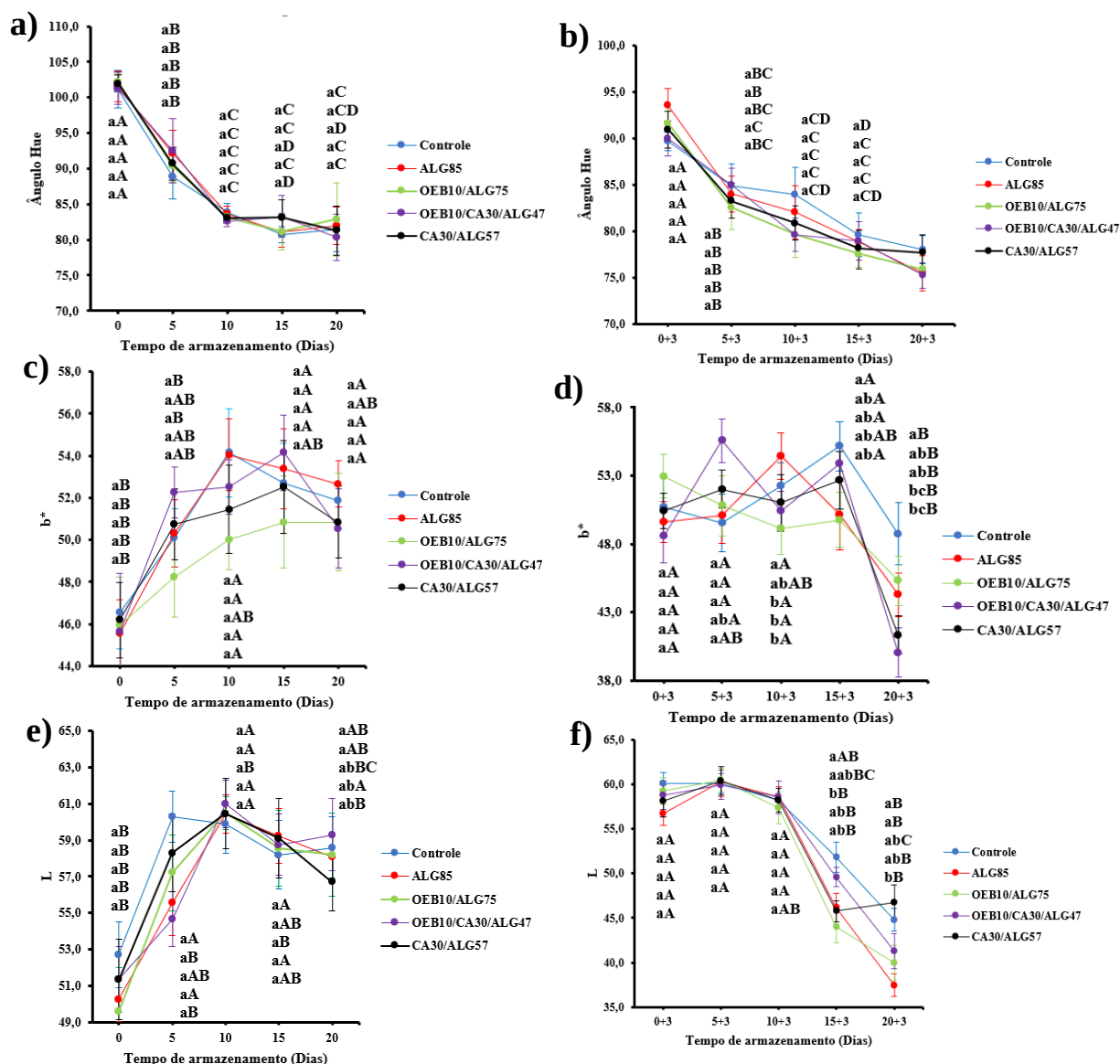
De acordo com a Figura 15 (a), a avaliação da mudança de coloração na casca da banana armazenada a 15 °C mostrou variações ao longo do tempo. Foi possível observar que o ângulo de hue das bananas revestidas e não revestidas diminuiu com o tempo, sem haver significância estatística. O valor do ângulo hue iniciou $101,2 \pm 2,20$. No entanto, com a progressão do tempo e o aumento da respiração, a clorofila presente na epiderme foi gradualmente hidrolisado por ação enzimática. Como resultado, os carotenoides e a luteína, que possuem coloração amarela, aumentam sua expressão de forma contínua (XIE *et al.*, 2022), reduzindo o valor do ângulo hue entre $82,85 \pm 5,17$ e $80,35 \pm 3,23$. Analisando o período de avaliação em armazenamento a 23 °C, Figura 15 (b), houve mudança na coloração da casca em todos os grupos, mas não houve diferença estatística entre os tratamentos.

Em relação ao parâmetro b^* , que reflete a mudança da cor azul para amarelo, observou-se uma tendência de aumento inicial e subsequentemente diminuição, Figura 15 (c). Além disso, apenas no tempo 10 houve diferença estatística do revestimento OEB10/CA30/ALG47 ($49,5 \pm 4,33$) em comparação ao controle ($54,15 \pm 6,13$) e o tratamento ALG85 ($54,05 \pm 3,73$). Esses valores indicam um amarelamento mais acelerado nos frutos controle do que revestidos com cera de abelha e óleo essencial, mostrando que esses tratamentos evitam o processo de oxidação e escurecimento da casca da banana nesse determinado período de tempo em refrigeração (SANTOSH *et al.*, 2025). Na avaliação do *shelf life*, Figura 15 (d), apenas o revestimento OEB10/ALG75 ($35,25 \pm 1,84bB$) apresentou diferença estatisticamente significativa, no tempo 20+3, em relação ao grupo controle ($48,75 \pm 2,31aB$). Esse valor de média menor do fruto revestido com OEB10/ALG75 indica uma maior eficácia na preservação da qualidade diante de períodos mais prolongados.

O parâmetro L, que indica a luminosidade (valores positivos correspondendo a branco e negativo a preto), não apresentou diferença significativa entre os grupos analisados, Figura 15 (e). Observou-se, entretanto, um leve aumento no valor de L no tempo 5, que se mantém ao longo do período de armazenamento. Entretanto, no tempo 15+3, figura 15 (f), os revestimentos ALG85 ($46,2 \pm 2,6bB$) e OEB10/ALG75 ($44 \pm 2,8bB$) apresentaram médias menores e diferença estatística em relação ao controle ($51,8 \pm 6,7aAB$).

No geral, os revestimentos que continham óleo essencial de bamburral conferiram uma barreira protetora maior e consequentemente a redução da degradação da qualidade das bananas durante o armazenamento pós-colheita.

Figura 14. A cor da casca da banana cv. prata.



Legenda: Ângulo Hue (a e b), b^* (c e d) e Luminosidade (e e f) de frutos de banana sem embalagem (controle) e embalados em saco à base de alginato de sódio, cera de abelha e óleo essencial sob armazenamento refrigerado a 15°C e 60% UR (a, c e e) e após o período de validade a 23°C e 60% de UR (b, d e f). Cada ponto de dados representa a média $\pm$ desvio padrão. Barras verticais representam o desvio padrão das médias de três repetições. Diferentes letras minúsculas indicam a diferença estatisticamente significativa entre tratamentos no mesmo tempo de armazenamento pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Diferentes letras maiúsculas indicam a diferença estatisticamente significativa entre dias de armazenamento no mesmo tratamento pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Fonte: Elaboração própria, 2024.

4.3.3 Avaliação das características químicas das bananas

4.3.3.1 Acidez

A redução de acidez nas frutas durante o amadurecimento é um fenômeno bem documentado, e no caso das bananas, é um dos indicadores do progresso do

amadurecimento. O amolecimento da polpa e a conversão de compostos ácidos em açúcares simples são processos naturais que ocorrem durante a senescência da fruta (THAKUR *et al.*, 2019). No entanto, a redução de acidez nem sempre é desejável, principalmente em contextos comerciais, onde a preservação da qualidade sensorial e nutricional da fruta durante o *shelf life* são necessárias.

A acidez das bananas em todos os grupos apresentou uma redução ao longo do experimento. No entanto, conforme mostrado na Figura 15, o grupo controle, que não recebeu nenhum revestimento, apresentou uma redução mais acentuada da acidez ao longo do tempo, destacando-se significativamente em relação aos outros grupos nos períodos de 0+3, 5+3, 10+3 e 20+3 dias de *shelf life*. Este resultado era esperado, pois as frutas sem revestimento continuam seu processo natural de amadurecimento. O nível de ácidos orgânicos, em raras exceções, tende a diminuir à medida que as frutas amadurecem, devido ao seu consumo como substrato no processo respiratório ou à sua conversão em açúcares, esse processo está diretamente relacionado à aceleração da senescência da fruta. (CHITARRA; CHITARRA., 2007).

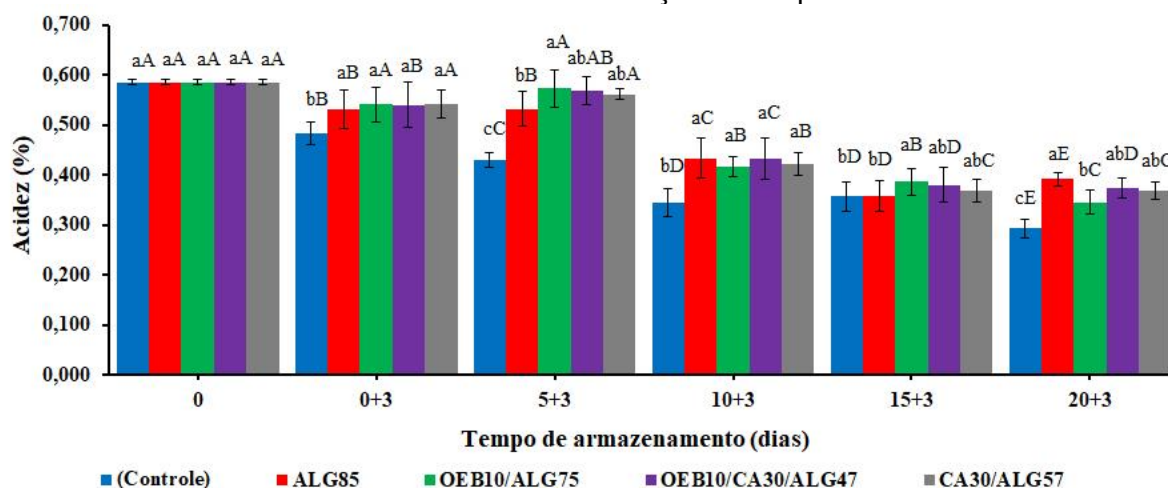
A maior redução de acidez no grupo controle sugere que as bananas sem revestimento amadureceram de maneira mais rápida, provavelmente devido à maior taxa de respiração e troca gasosa, características comuns em frutas não revestidas. Para a indústria, uma perda rápida de acidez pode resultar em frutas que atingem rapidamente um estágio avançado de amadurecimento, o que comprometeria a vida útil e a qualidade sensorial das bananas (HOSSEINI; MOUSAVI; MCCLEMENTS, 2023; DENG *et al.*, 2024; YU *et al.*, 2024; DENG *et al.*, 2024)

O tratamento ALG85, apresentou diferenças significativas em relação aos outros tratamentos com revestimento nos períodos de 5+3 e 15+3 dias de *shelf life*. Apesar do alginato de sódio ser amplamente utilizado na indústria de alimentos devido à sua capacidade de formar filmes comestíveis (METHA; PAWAR; SUVARNA, 2024), nesse estudo não houve diferença, nesses determinados tempos, em comparação ao grupo controle.

O efeito observado no tratamento ALG85 sugere que o revestimento com alginato tem a capacidade de modular a taxa de amadurecimento das bananas, retardando a conversão de ácidos e, portanto, a redução da acidez. Embora o amadurecimento não tenha sido completamente retardado, a redução mais lenta da acidez pode ser desejável para prolongar o *shelf life* da fruta.

Por outro lado, os tratamentos que incluíram cera de abelha e óleo essencial de baurburral não apresentaram uma redução tão acentuada da acidez quanto o tratamento com ALG85. Esses revestimentos são conhecidos por suas propriedades de barreira física (TEDESCHI et al., 2018). No entanto, a adição de cera de abelha e óleo essencial pode ter influenciado a permeabilidade do revestimento, alterando a dinâmica da respiração e do amadurecimento das bananas de maneira mais eficiente do que o alginato puro. A combinação desses compostos pode ter contribuído para um melhor equilíbrio nas trocas gasosas, promovendo assim a manutenção das características fisiológicas da fruta (LAKSCHAN et al., 2024). Dessa forma, a incorporação da cera de abelha e do óleo essencial ao revestimento de alginato demonstrou um efeito positivo ao retardar a redução da acidez nas bananas, retardando o processo de amadurecimento.

Figura 15. Acidez titulável das polpas de bananas revestidas com alginato de sódio, cera de abelha e óleo essencial de baurburral em função do tempo de armazenamento.



Cada ponto de dados representa a média acompanhada do desvio padrão ($\pm$). As barras verticais indicam o desvio padrão das médias obtidas a partir de quatro repetições. Letras minúsculas diferentes sinalizam uma diferença estatisticamente significativa entre os tratamentos no mesmo intervalo de armazenamento, conforme o teste de Tukey ($p < 0,05$). Por sua vez, letras maiúsculas diferentes indicam uma diferença estatisticamente significativa entre os dias de armazenamento dentro do mesmo tratamento, também segundo o teste de Tukey ($p < 0,05$).

Fonte: Elaboração própria, 2024.

4.3.3.2 Sólidos solúveis

A análise de sólidos solúveis (SS), apresentada na Figura 16, é uma importante ferramenta na avaliação da qualidade pós-colheita das frutas, principalmente para monitorar o progresso do amadurecimento. Os sólidos solúveis, que incluem açúcares e outros compostos solúveis em água, tendem a aumentar à medida que as frutas amadurecem, refletindo a conversão de amido em açúcares simples e a degradação de

ácidos (CHITARRA; CHITARRA., 2007).

O aumento observado nos sólidos solúveis em todos os grupos de tratamento está em conformidade com o processo natural de amadurecimento das bananas. Durante o amadurecimento, o amido armazenado nas frutas é convertido em açúcares, resultando em um aumento nos SS (YAN *et al.*, 2024). O grupo controle, apresentou o maior aumento em SS no período de 20+3 dias, o que era esperado, pois as frutas não revestidas continuam seu processo de amadurecimento sem a barreira dos revestimentos. A ausência de barreiras físicas, facilita a conversão do amido, acelera a degradação de ácidos e favorece a produção de açúcares simples (DENG *et al.*, 2022).

A maior quantidade de sólidos solúveis no grupo controle é um reflexo da aceleração do processo de amadurecimento e da conversão dos ácidos em açúcares, que ocorre com maior rapidez quando não há revestimento para retardar essa dinâmica. Isso é consistente com a literatura que aponta para o aumento de sólidos solúveis como um indicador direto da senescência em bananas (QIN *et al.*, 2024).

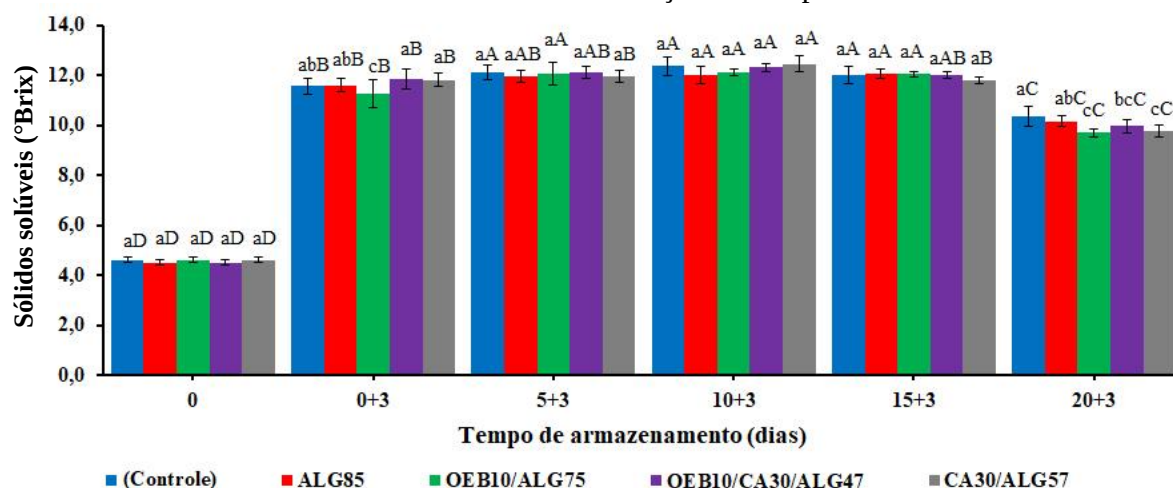
O tratamento ALG85 também mostrou aumento significativo nos sólidos solúveis aos 20+3 dias, embora o aumento tenha sido menor em comparação com o grupo controle. Isso sugere que o alginato, apesar de ser uma barreira semipermeável que reduz a troca gasosa, foi capaz de moderar a aceleração do amadurecimento da banana. Embora o aumento de sólidos solúveis tenha ocorrido, o fato de o tratamento com alginato apresentar uma quantidade inferior de SS em comparação com o grupo controle indica que a barreira do alginato interferiu de maneira eficiente no processo de amadurecimento, retendo os açúcares por mais tempo (METHA; PAWAR; SUVARNA, 2024).

Os tratamentos OEB10/ALG75, OEB10/CA30/ALG47 e CA30/ALG57 apresentaram o menor aumento de sólidos solúveis no período de 20+3 dias, sugerindo que esses compostos podem ter influenciado de forma mais acentuada a dinâmica de conservação das bananas. A cera de abelha é conhecida por suas propriedades de formação de uma camada protetora, podendo ter afetado a taxa de conversão de amido e a dinâmica do aumento de sólidos solúveis. Estes resultados estão de acordo com a literatura (HOSSEINI *et al.*, 2023; ZHANG *et al.*, 2024; WARDAL *et al.*, 2024).

De forma geral, os sólidos solúveis indicaram que o amadurecimento das bananas foi modulado pelos revestimentos aplicados. O grupo controle teve o maior aumento de SS, refletindo um amadurecimento mais rápido. O tratamento com ALG85

também mostrou aumento de SS, mas de forma mais moderada, o que sugere que o alginato ajudou a retardar o amadurecimento. Por outro lado, os tratamentos com alginato, cera de abelha e óleo essencial apresentaram menor aumento de SS.

Figura 16. Sólidos solúveis das polpas de bananas revestidas com alginato de sódio, cera de abelha e óleo essencial de bamburral em função do tempo de armazenamento.



Cada ponto de dados representa a média acompanhada do desvio padrão ($\pm$). As barras verticais indicam o desvio padrão das médias obtidas a partir de quatro repetições. Letras minúsculas diferentes sinalizam uma diferença estatisticamente significativa entre os tratamentos no mesmo intervalo de armazenamento, conforme o teste de Tukey ($p < 0,05$). Por sua vez, letras maiúsculas diferentes indicam uma diferença estatisticamente significativa entre os dias de armazenamento dentro do mesmo tratamento, também segundo o teste de Tukey ($p < 0,05$).

Fonte: Elaboração própria, 2024.

4.3.3.3 Amido

A avaliação do amido nas polpas de bananas, conforme mostrado na Figura 17, revelou uma redução progressiva do amido ao longo do tempo. Esse fenômeno é geralmente acompanhado pelo aumento de sólidos solúveis, como açúcares, que são derivados da degradação do amido e da conversão dos ácidos orgânicos (CHITARRA; CHITARRA *et al.*, 2007).

O grupo controle demonstrou a maior perda de amido durante o experimento, principalmente no período de 20+3 dias, o que está em concordância com o comportamento esperado para frutas não tratadas. Sem a proteção proporcionada por meio de um revestimento, as bananas no grupo controle amadureceram mais rapidamente, convertendo o amido em açúcares. Isso resultou em uma aceleração do processo de senescência, o que pode ser observado pela maior redução de amido (DENG *et al.*, 2022).

Além disso, a conversão de amido em açúcares é uma das principais reações

metabólicas que ocorre durante o amadurecimento das bananas, e o aumento dos sólidos solúveis corroborou com essa observação (HOSSEINI *et al.*, 2023; ZHANG *et al.*, 2024; WARDAK *et al.*, 2024). O grupo controle, portanto, mostrou que a ausência de revestimentos acelerou a degradação do amido e o aumento de açúcares, o que pode resultar em uma doçura maior e uma textura mais macia, características desejadas em bananas muito maduras, mas não ideais para armazenamento prolongado (YAN *et al.*, 2024).

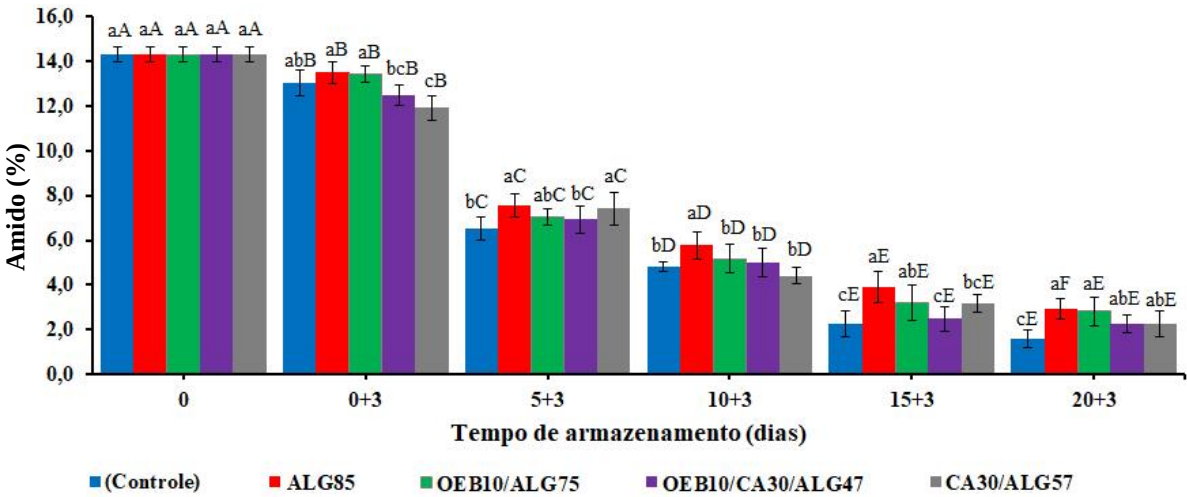
Nos tratamentos OEB10/CA30/ALG47 e CA30/ALG57, observou-se uma redução mais elevada do amido no período de 0+3 dias, com diferenças significativas em relação aos outros tratamentos. Essa redução mais rápida pode ser atribuída ao efeito combinado dos componentes desses revestimentos, alginato de sódio, cera de abelha e óleo essencial, que pode agir para reduzir a atividade das amilases (enzimas responsáveis pela conversão do amido em açúcares) (TEDESCHI *et al.*, 2018; KHATTAK *et al.*, 2022).

No período de 5+3 dias, os tratamentos OEB10/CA30/ALG47 e ALG85 exibiram diferenças significativas, com o grupo ALG85 mostrando a maior redução de amido. Isso sugere que, além da proteção inicial oferecida pelos revestimentos, as bananas não revestidas continuaram a amadurecer de forma mais acelerada.

A maior redução de amido no grupo controle reflete o comportamento típico das bananas sem revestimento, que, ao serem expostas ao ambiente, sofrem uma maior troca gasosa, o que favorece a aceleração do processo de amadurecimento. O revestimento com alginato, cera de abelha e óleo essencial, portanto, exerce um papel importante ao reduzir o amadurecimento limitando a degradação do amido (YAN *et al.*, 2024).

Em geral, a análise do amido nas polpas de bananas indicou que os tratamentos com revestimento influenciam diretamente o processo de degradação do amido durante o *shelf life*. O grupo controle mostrou a maior perda de amido ao longo do tempo, demonstrando uma aceleração do amadurecimento, enquanto os tratamentos com revestimento apresentaram uma maior preservação do amido.

Figura 17. Amido das polpas de bananas revestidas com alginato de sódio, cera de abelha e óleo essencial de baurburral em função do tempo de armazenamento.



Cada ponto de dados representa a média acompanhada do desvio padrão ($\pm$). As barras verticais indicam o desvio padrão das médias obtidas a partir de quatro repetições. Letras minúsculas diferentes sinalizam uma diferença estatisticamente significativa entre os tratamentos no mesmo intervalo de armazenamento, conforme o teste de Tukey ($p < 0,05$). Por sua vez, letras maiúsculas diferentes indicam uma diferença estatisticamente significativa entre os dias de armazenamento dentro do mesmo tratamento, também segundo o teste de Tukey ($p < 0,05$).

Fonte: Elaboração própria, 2024.

4.3.4 Ensaio *in vitro* da atividade antifúngica do óleo essencial de baurburral

A atividade antifúngica do OEB destacou-se por sua eficácia contra *Colletotrichum sp.* e *Fusarium sp.*, alcançando uma taxa de inibição de 36% para *Colletotrichum sp.* e 29% para *Fusarium sp.* com a dosagem de 200 μ L/100 mL, conforme apresentado na Tabela 8 e nas Figuras 18 e 19.

Tabela 8. Atividade antifúngica do óleo essencial de baurburral.

Tratamento	Volume de OEB (μ L/100mL)	<i>Colletotrichum sp.</i>		<i>Fusarium sp.</i>	
		D.C (cm)	P.I.C (%)	D.C (cm)	P.I.C (%)
Controle	0	8 $\pm$ 0	0	8 $\pm$ 0	0
OEB	200	5 $\pm$ 0,2	36	6 $\pm$ 0,6	29

Abreviaturas: OEB, óleo essencial de baurburral; D.C, Diâmetro de circunferência; P.I.C, Porcentagem de Inibição do Crescimento.

Fonte: Autoria própria, 2024.

Inicialmente, esse resultado pode ter sido encontrado devido os óleos essenciais terem a capacidade de causar coagulação celular e danos irreparáveis à membrana plasmática. Além disso, aumentam a permeabilidade da membrana, interferindo na síntese de ATP e rompendo as estruturas intracelulares, incluindo mitocôndrias, por meio de um mecanismo de permeação.

Também afetam a fluidez da parede celular, induzindo danos oxidativos, comprometendo as vias do citocromo C e alterando a regulação de íons, como cálcio e ATP, o que reduz a estabilidade da membrana (HOU *et al.*, 2022).

Segundo a literatura, os monoterpenóides podem apresentar uma atividade de inibição variável no *Colletotrichum sp.* indicando que a sensibilidade fúngica está relacionada com a espécie testada e dose aplicada (SCARIOT *et al.*, 2020). Os compostos monoterpenóides como o 1,8-cineol e sabineno, predominantes no óleo essencial de *Hyptis suaveolens*, possuem propriedades químicas que justificam sua atividade antifúngica, sobretudo contra fitopatógenos como *Fusarium sp.* e *Colletotrichum sp.* Em relação ao composto majoritário identificado (Tabela 5), 1,8-cineol, também conhecido como eucaliptol (HOCH *et al.*, 2023), seu potencial antifúngico, de acordo com pesquisas anteriores, foi atribuído à forma sinérgica como este composto age com outros compostos presentes, apresentando elevados efeitos no crescimento de micélios, como os de *Colletotrichum gloeosporioides*, principal causador da doença antracnose (HUANG *et al.*, 2021). Além disso, observações feitas por microscopia óptica e eletrônica identificaram que óleos de *H. suaveolens* com 44% de 1,8-cineol apresentaram a capacidade de causar danos severos e alterações nas hifas vegetativas de *Fusarium oxysporum f. sp.* (TRIPATHI; SHARMA; SHARMA., 2009).

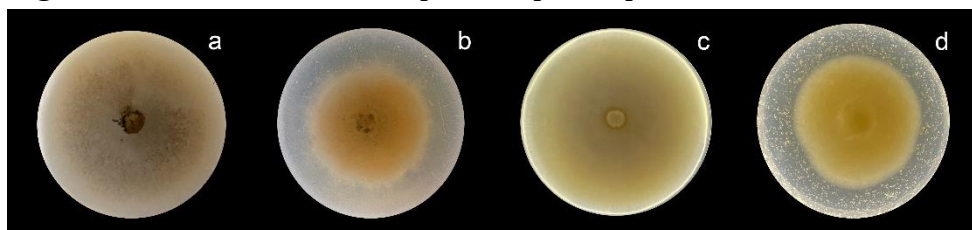
Figura 18. Visão do anverso da placa de petri representando cada tratamento.



Legenda: a) *Colletotrichum sp.* (controle); b) *Colletotrichum sp.* (OEB); c) *Fusarium sp.* (controle); d) *Fusarium sp.* (OEB).

Fonte: Elaboração própria, 2024.

Figura 19. Visão do reverso da placa de petri representando cada tratamento.



Legenda: a) *Colletotrichum sp.* (controle); b) *Colletotrichum sp.* (OEB); c) *Fusarium sp.* (controle); d) *Fusarium sp.* (OEB).

Fonte: Elaboração própria, 2024.

4.3.5 Avaliação sensorial dos frutos

Os resultados da avaliação sensorial de aceitação de compra (1), ocorrência de fungos (2) e adesividade do filme (3) das bananas realizada ao longo dos 23 dias de armazenamento, estão apresentados na Figura 14.

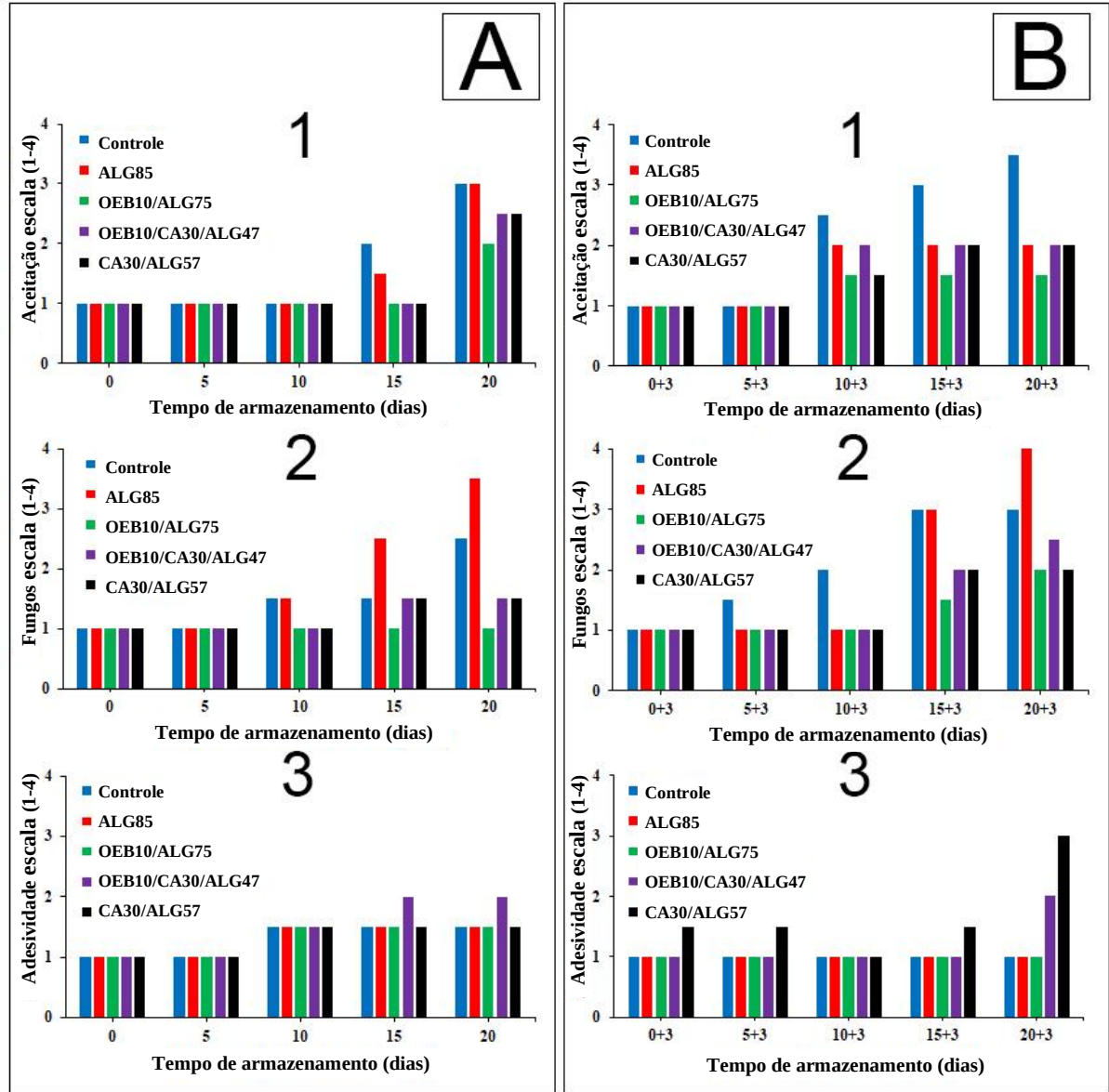
A avaliação das frutas, em relação à aceitação de compra, Figura 20 (A-1), mostrou que o controle durante o armazenamento em refrigeração, nos tempos de 15 e 20 dias, apresentou a maior média de aceitação, 2 e 3, respectivamente. No último período, houve um resultado similar ao tratamento ALG85. No armazenamento à temperatura ambiente, Figura 20 (B-1), observou-se também que o controle nos tempos 10+3, 15+3 e 20+3 obteve as maiores médias, 2,5, 3 e 3,5, respectivamente. O tratamento OEB10/ALG75 apresentou a menor média e, consequentemente, a melhor aceitação em todos os tempos quando comparado aos demais.

Da mesma forma, em relação ao índice de ocorrência de fungos, Figura 20 (A-2), o revestimento ALG85 sob armazenamento em refrigeração nos tempos de 10, 15 e 20 dias obteve as maiores médias, 1,5, 2,5 e 3,5, respectivamente. Resultado similar também encontrado sob temperatura ambiente, Figura 20 (B-2), nos tempos 15+3 e 20+3, com médias, 3 e 4, respectivamente. O tratamento OEB10/ALG75 também apresentou a melhor avaliação em todos os tempos quando comparado com os demais tratamentos.

O crescimento acentuado de fungos como *Colletotrichum* sp. e *Fusarium* sp. em bananas revestidas com alginato de sódio (Figura 21) pode ser atribuído à natureza polissacarídica desse composto (ZHANG *et al.*, 2023). Além disso, esse biopolímero, por ser altamente hidrofílico e apresentar propriedades hidratantes, contribui para a formação de um ambiente favorável ao desenvolvimento microbiano (LINH *et al.*, 2024). Embora não existam relatos que comprovem diretamente esse efeito, os resultados observados destacam a necessidade de estratégias complementares, como a incorporação de agentes antifúngicos, como o óleo essencial de baurburral, ao revestimento, para mitigar os impactos negativos associados ao uso do alginato de sódio.

A avaliação da adesividade dos revestimentos, Figura 20 (A-3) demonstrou que o tratamentos que continham cera de abelha obtiveram uma baixa adesividade. Sob refrigeração, o tratamento OEB10/CA30/ALG47 apresentou nos tempos 15 e 20, médias de 2. Além disso, sob temperatura ambiente apresentou nos tempos 0+3, 5+3, 15+3, médias de 1,5. O tratamento CA30/ALG57 teve a maior média do tempo 20+3, sendo 3, figura 20 (B-3). Os frutos que foram revestidos com os tratamentos que continham apenas alginato de sódio e óleo essencial de baurburral apresentaram os melhores resultados de adesividade.

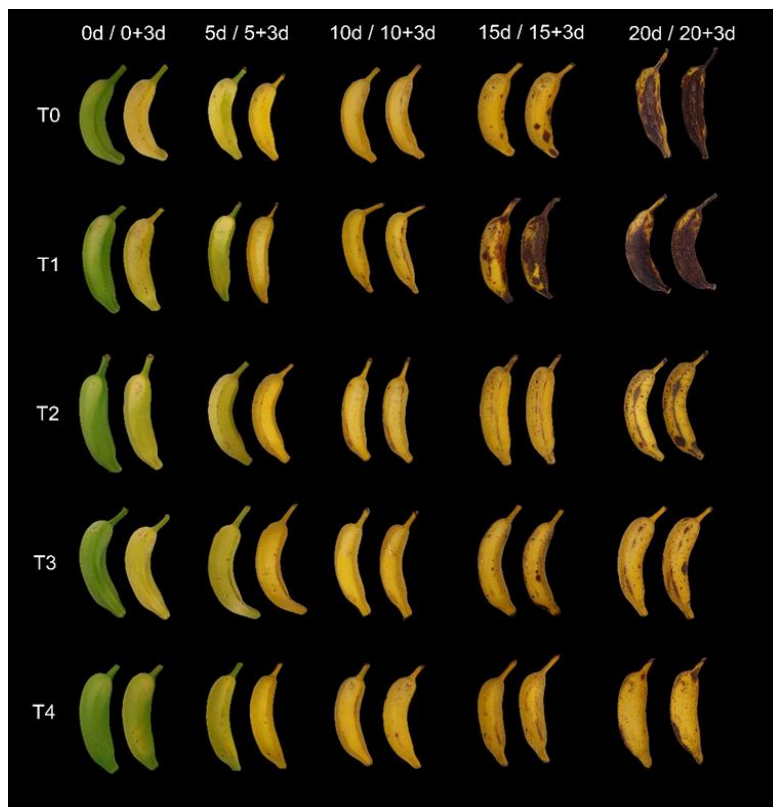
Figura 20. Análise sensorial de bananas armazenadas durante 23 dias sob condições refrigeradas (15 °C), utilizando uma escala hedônica (a) Aceitação de compra; (b) Ocorrência de Fungos; (c) Adesividade do filme; e temperatura ambiente (23 °C), utilizando uma escala hedônica (d) Aceitação de compra; (e) Presença de Fungos; (f) Adesividade do filme.



Legenda: Pontuação para Aceitação: 1 = “Excelente (fresco)”, 2 = “Bom (desidratação leve, aparentemente fresco comercial)”, 3 = “Aceitável (desidratação moderada. Comercial)” e 4 = “Inaceitável (desidratação grave, enrugado, mofo)”. Ocorrência de fungo: 1 = “Excelente (ausência de fungo)”, 2 = “Bom (fungo leve afetando pequenas áreas do fruto)”, 3 = “Aceitável (fungo moderado afetando até duas áreas diferentes do fruto)” e 4 = “Inaceitável (fungo severo afetando mais de 50% do fruto)” Adesividade do filme: 1 = “Excelente (sem descamação)”, 2 = “Bom (leve descamação)”, 3 = “Aceitável (com descamação afetando pequenas áreas do fruto)” e 4 = “Inaceitável (com descamação intensa afetando mais 50% do fruto)”.

Fonte: Elaboração própria, 2024.

Figura 21. Ilustração da aparência externa de bananas Prata, acondicionadas com diferentes revestimentos a $15 \pm 2^\circ\text{C}$ por 20 dias e $23 \pm 2^\circ\text{C}$ por 23 dias.



Legenda: T0: Banana sem revestimento (controle); T1: Banana com revestimento de alginato sem cera e óleo de baurral (ALG85); T2: Banana com revestimento de alginato e óleo, sem cera (OEB10/ALG75); T3: Banana com revestimento de alginato, óleo de baurral e cera (OEB10/CA30/ALG47); e T4: Banana com revestimento de alginato e cera sem óleo de baurral (CA30/ALG57).

Fonte: Elaboração própria, 2024.

5. CONCLUSÕES

A pesquisa evidenciou que a composição dos filmes biopoliméricos à base de alginato de sódio, cera de abelha e óleo essencial de Bamburral exerce influência direta sobre suas propriedades físicas, ópticas e mecânicas. A presença de cera de abelha e óleo essencial aumentou a espessura e a resistência à permeabilidade à água dos filmes, conferindo-lhes características hidrofóbicas e compactas. Enquanto a cera de abelha alterou a opacidade e a tonalidade, o óleo essencial não teve efeito significativo sobre essas propriedades. As análises morfológicas e mecânicas confirmaram que a interação entre os componentes resultou em filmes mais heterogêneos e com maior plasticidade, particularmente devido à ação plastificante do glicerol e do óleo essencial.

No contexto da aplicação em frutas, os filmes revestidos com a combinação de alginato, cera de abelha e OEB demonstraram um desempenho superior na preservação da qualidade das bananas, retardando o amadurecimento e mantendo as características sensoriais e físico-químicas das frutas. A redução da perda de peso e a preservação da firmeza indicam o potencial dos revestimentos como uma solução eficaz para aumentar a vida útil das frutas durante o armazenamento.

O óleo essencial de *H. suaveolens* apresentou uma atividade antifúngica significativa contra *Colletotrichum* sp. e *Fusarium* sp., sendo o efeito mais pronunciado contra *Colletotrichum* sp.. O 1,8-cineol, principal composto identificado, demonstrou ser eficaz no combate a fungos devido à sua capacidade de induzir danos nas membranas celulares destes. Esses resultados reforçam o potencial do OEB como uma alternativa natural promissora para o controle de doenças fúngicas, particularmente em sistemas de embalagens para frutas.

Por fim, apesar de o filme composto por alginato de sódio, cera de abelha e óleo essencial de Bamburral ter apresentado resultados promissores como antifúngico, estudos futuros poderiam investigar a eficácia de doses maiores de óleo essencial de Bamburral para potencializar suas propriedades antifúngicas. Além disso, seria relevante explorar a aplicação de outros biopolímeros com maior capacidade antimicrobiana, ampliando as possibilidades de formulações mais eficazes. Essas abordagens poderiam aprimorar a proteção de frutas contra patógenos, prolongando sua vida útil pós-colheita. Tais avanços contribuiriam para o desenvolvimento de alternativas sustentáveis no manejo da qualidade alimentar.

REFERÊNCIAS

ABERA, B.; DURAISAMY, R.; BIRHANU, T. Study on the preparation and use of edible coating of fish scale chitosan and glycerol blended banana pseudostem starch for the preservation of apples, mangoes, and strawberries. **Journal of Agriculture and Food Research**, [S. l.], ano 2024, v. 15, p. 100916, 2 mar. 2024.

ADAMS, R. P. **Identification of Essential Oil Components by Gas Chromatography/Quadrupole Mass Spectroscopy**. 4. ed. Carol Stream: Allured Publishing Corporation, 2007. 804 p.

AGUIRRE-LOREDO, R. Y.; RODRIGUEZ-HERNANDEZ, A. I.; VELAZQUEZ, G. Modelling the effect of temperature on the water sorption isotherms of chitosan films. **Food Science and Technology**, v. 37, n. 1, p. 112-118, 2017.

ALKAABI, S. *et al.* Lemongrass essential oil and aloe vera gel based antimicrobial coatings for date fruits. **Applied Food Research**, ano 2022, v. 2, p. 100127, 18 maio 2022.

AMADO, L. R.; SILVA, K. S.; MAURO, M. A. Alginate and pH Improve Properties of Soy Protein-based Films. **Food Biophysics**, [S. l.], v. 19, p. 256-268, 23 dez. 2023.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR ISO 11136. **Análise sensorial - Metodologia - Guia geral para condução de testes hedônicos com consumidores em ambientes controlados**. Rio de Janeiro; 2016.

ASTM D882-91. **Standard test methods for tensile properties of thin plastic sheeting**. Annual Book of Standards, 1996.

ASTM E96/E96M-12. **Standard test methods for water vapour transmission of materials**. Annual Book of Standards, 1993.

ASTUDILLO, Y. I. M. *et al.* Postharvest physiology and technology of *Spondias purpurea* L. and *S. mombin* L. **Scientia Horticulturae**, ano 2014, v. 174, p. 193-206, 24 jun. 2014.

AZEVEDO, N. R. *et al.* Essential oil chemotypes in *Hyptis suaveolens* from Brazilian Cerrado. **Biochemical Systematics and ecology**, ano 2002, v. 30, p. 205-216, 2002.

BEN, Z. Y.; SAMSUDIN, H.; YHAYA, M. F. Glycerol: Its properties, polymer synthesis, and applications in starch based films. **European Polymer Journal**, [S. l.], ano 2022, v. 175, p. 111377, 15 jul. 2022.

BENELLI, G. *et al.* Toxicity of some essential oil formulations against the Mediterranean fruit fly *Ceratitis capitata* (Wiedemann) (Diptera Tephritidae). **Crop Protection**, [S. l.], ano 2012, v. 42, p. 223-229, 16 dez. 2012.

BENITEZ, F. J. B. *et al.* Impact of edible coatings on quality of fruits: A review. **Food Control**, [S. l.], ano 2022, v. 139, p. 109063, 2 maio 2022.

BEZERRA, J. W. A. *et al.* Chemical composition and toxicological evaluation of *Hyptis suaveolens* (L.) Poiteau (LAMIACEAE) in *Drosophila melanogaster* and *Artemia salina*. **South African Journal of Botany**, [S. l.], ano 2017, v. 13, p. 437-442, 14 out. 2017.

BONIFACIO, A. *et al.* Plasticizer design strategies enabling advanced applications of cellulose acetate. **European Polymer Journal**, [S. l.], ano 2023, v. 197, p. 112360, 10 out. 2023.

BOTCHA, S; PRATTIPATI, S D. Antioxidant, antimetastatic and apoptotic potential of silver nanoparticles synthesized by leaf and callus extracts of *Hyptis suaveolens* L. **South African Journal of Botany**, [S. l.], ano 2023, v. 160, p. 36-45, 26 jun. 2023.

BRAND-WILLIAMS, W., CUVELIER, M. E., BERSET, C. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. **LWT - Food Science and Technology**, Amsterdam, v. 28, p. 25–30, 1995.

CHITARRA, M. I. F.; CHITARRA, A. B. Pós-colheita de frutas e hortaliças: fisiologia e manuseio. 2. ed. Lavras: UFLA, 2007. 785 p.

CLSI. Manual Clinical and Laboratory Standards Institute. **Methods for dilution**

antimicrobial susceptibility tests for bacteria that grow aerobically; approved standards 6th ed. Document M7-A6 performance standards for antimicrobial susceptibility testing. Clinical and Laboratory Standards Institute, Wayne, PA., 2003.

COSTA, B. N. S. *et al.* Different types of soil mulches in the leaf anatomy and physiology of 'BRS Platina' banana in a non-irrigated management. **Scientia Horticulturae**, [S. l.], ano 2022, v. 292, p. 110605, 27 jan. 2022.

DANIA, V. O.; OLALLEYE, E. A. Chemical characterization of essential oil constituents of three selected botanicals and their antimicrobial activity against postharvest rot pathogens of tomato (*Solanum lycopersicum* L.). **Archives of Phytopathology and Plant Protection**, [S. l.], ano 2022, v. 55, n. 5, p. 564–582, 7 fev. 2022.

DAS, Sudip Kumar *et al.* Antibacterial and antibiofilm activities of nanoemulsion coating prepared by using caraway oil and chitosan prolongs the shelf life and quality of bananas. **Applied Food Research**, [S. l.], ano 2023, v. 3, p. 100300, 4 maio 2023.

DENG, P. *et al.* Multifunctional sodium alginate-based self-healing edible cross-linked coating for banana preservation. **Food Hydrocolloids**, [S. l.], ano 2024, v. 151, p. 109753, 16 jan. 2024.

DENG, W. *et al.* Effect of Surfactant Formula on the Film Forming Capacity, Wettability, and Preservation Properties of Electrically Sprayed Sodium Alginate Coats. **Foods**, [S. l.], ano 2023, v. 12, p. 2197, 30 maio 2023.

DWIVANY, F. Ma. *et al.* Carrageenan Edible Coating Application Prolongs Cavendish Banana Shelf Life. **International Journal of Food Science**, [S. l.], v. 2020, p. 11, 28 ago. 2020.

AROUCHA, E. M. M. *et al.* Shelf-life of green asparagus using cassava and chitosan blend coating. **Brazilian Journal of Food and Technology**, v. 27, p. 1-14, 2024.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária 2022. Disponível em EMBRAPA.EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA E AGROPECUÁRIA. **Geração de Técnicas de Conservação Pós-Colheita para Valorização do Cultivo de Cajá e Seriguela**

no Estado do Ceará. Agroindústria Tropical. Relatório Técnico Final de Projeto. Fortaleza-CE, 2001.

ESLAMI, Z. *et al.* A Review of the Effect of Plasticizers on the Physical and Mechanical Properties of Alginate-Based Films. **Molecules**, [S. l.], ano 2023, v. 28, p. 6634, 15 set. 2023.

FACUNDO, H. V. V. *et al.* Shotgun proteomics of Nanicão and Prata bananas reveals changes that may account for their different resistance to low temperature. **Scientia Horticulturae**, [S. l.], ano 2022, v. 306, p. 111454, 25 ago. 2022.

FAOSTAT. Crops and livestock products. Disponível em: FAOSTAT. Statistics Database. Disponível em: <<https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize>> Acesso realizado em 08 de março de 2025.

FAO. Food and Agriculture Organization - Banana Market Review 2023. Disponível em: FAOSTAT. Statistics Database. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/en/#data>> Acesso realizado em 25 de setembro de 2024.

FELICOLI, A. *et al.* In vitro antibacterial activity and volatile characterisation of organic *Apis mellifera ligustica* (Spinola, 1906) beeswax ethanol extracts. **Food Bioscience**, [S. l.], ano 2019, v. 29, p. 102-109, 14 abr. 2019.

FILHO, E. N. *et al.* Microencapsulation of acerola (*Malpighia emarginata* DC) AND ciriguela (*Spondias purpurea* L) mixed juice with different wall materials. **Food Chemistry Advances**, 2022, v. 1, p. 100046, 1 out. 2022.

FUENTES, K. *et al.* Comparative Study of Physicochemical Properties of Nanoemulsions Fabricated with Natural and Synthetic Surfactants. **Processes**, [S. l.], ano 2021, v. 9, p. 2002, 9 nov. 2021.

GEORGE, A. *et al.* A comprehensive review on chemical properties and applications of biopolymers and their composites. **International Journal of Biological Macromolecules**, [S. l.], ano 2020, v. 154, p. 329-338, 14 mar. 2020.

GEYER, R.; JAMBECK, J. R.; LAW, K. L. Production, use, and fate of all plastics ever made. **Science Advances**, v. 3, n. 7, p. e1700782, 2017.

GONZÁLEZ, M. A.; FELIX, M.; ROMERO, A. Influence of the plasticizer on rice bran-based eco-friendly bioplastics obtained by injection moulding. **Industrial Crops & Products**, v. 180, jun. 2022.

HOSSEINI, S. F.; MOUSAVI, Z.; MCCLEMENTS, D. J. Beeswax: A review on the recent progress in the development of superhydrophobic films/coatings and their applications in fruits preservation. **Food Chemistry**, [S. l.], ano 2023, v. 424, p. 136404, 30 out. 2023.

HOSSEINI, S. M. *et al.* Incorporation of essential oil in alginate microparticles by multiple emulsion/ionic gelation process. **International Journal of Biological Macromolecules**, [S. l.], ano 2013, v. 62, p. 582-588, 8 out. 2013.

HUTAURUK, V. H. D. *et al.* Application of nanoparticles blue-TiO₂-x and chitosan coating to delay ripening and suppress ethylene-related gene expression of Cavendish banana. **Scientia Horticulturae**, [S. l.], ano 2024, v. 338, p. 113457, 15 jul. 2024.

Hyptis suaveolens (L.) Poit. in GBIF Secretariat (2023). GBIF Backbone Taxonomy. Disponível em: < <https://doi.org/10.15468/39omei> > Acesso em 15 Set. 2024.

Disponível em IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística Disponível em: <www.sidra.ibge.gov.br> Acesso em 21 de junho de 2023.

IBGE. Produção Agrícola Municipal - Produção brasileira de banana em 2022. Embrapa Mandioca e Fruticultura. 2022. Disponível em: <http://www.cnpmf.embrapa.br/Base_de_Dados/index_pdf/dados/brasil/banana/b1_banana.pdf> Acesso em 12 Set. 2024.

ISERMEYER, H. Eine einfache Methode zur Bestimmung der Bodenatmung und der Karbonate im Boden. **Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde**, v. 56, n.

1-3, p. 26–38, 1952.

IVERSEN, L. J. L. *et al.* The Emergence of Edible and Food-Application Coatings for Food Packaging: A Review. **Molecules**, [S. l.], ano 2022, v. 27, n. 17, p. 5604, 31 ago. 2022.

JAFARZADEH, S. *et al.* Application of bio-nanocomposite films and edible coatings for extending the shelf life of fresh fruits and vegetables. **Advances in Colloid and Interface Science**, [S. l.], ano 2021, v. 291, p. 102405, 29 mar. 2021.

JAMES, K. *et al.* Bio-based film development: Harnessing alginate and fucoidan extracted from *Ascophyllum nodosum* with glycerol and choline chloride-based solvent. **Food Hydrocolloids**, [S. l.], ano 2024, v. 153, p. 110013, 19 mar. 2024.

JEDERMANN, R. *et al.* Remote quality monitoring in the banana chain. Philos. **Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences**. [S. l.], ano 2014, v. 372, p. 20130303, 13 jun. 2014.

KAZEMI, M. *et al.* Development of antimicrobial gelatin-ulvan-beeswax composite films: Optimization of formulation using mixture design methodology. **International Journal of Biological Macromolecules**, ano 2023, v. 231, p. 123384, 21 jan. 2023.

KHATTAK, S. H. *et al.* Fruit Ripening Characterization and Amylase Mystery in Bananas. **Global Journal of Nutrition & Food Science**, [S. l.], ano 2022, v. 4, n. 1, p. 570-577, 19 set. 2022.

KOKETSU, M.; GONÇALES, S.L. **Óleos essenciais e sua extração por arraste a vapor**. Rio de Janeiro, EMBRAPA-CTAA, 1991. 24p.

KUMAR, H. Physicochemical characterization of antioxidant film based on ternary blend of chitosan and Tulsi-Ajwain essential oil for preserving walnut. **International Journal of Biological Macromolecules**, [S. l.], ano 2024, v. 278, p. 134880, 18 ago. 2024.

LAKSHAN, N. D. *et al.* Clove essential oil emulsions-loaded arrowroot starch-beeswax-based

edible coating extends the shelf life and preserves the postharvest quality of fresh tomatoes (*Solanum lycopersicum* L.) stored at room temperature. **Sustainable Food Technology**, [S. l.], ano 2024, v. 2, p. 1052-1068, 19 jul. 2024.

LI, Q. *et al.* The metabolism of membrane lipid participates in the occurrence of chilling injury in cold-stored banana fruit. **Food Research International**, [S. l.], ano 2023, v. 173, p. 113415, 28 ago. 2023.

LINH, C. T. M. *et al.* Effectiveness of sodium alginate-based coating on the preservation of Da xanh pomelo fresh-cut. **Applied Food Research**, [S. l.], ano 2024, p. 100426, 10 maio 2024.

LIU, R. *et al.* Effects of beeswax emulsified by octenyl succinate starch on the structure and physicochemical properties of acid-modified starchfilms. **International Journal of Biological Macromolecules**, [S. l.], ano 2022, v. 219, p. 262-272, 2 ago. 2022.

LIU, W. *et al.* Self-assembly fabrication of chitosan-tannic acid/MXene composite film with excellent antibacterial and antioxidant properties for fruit preservation. **Food Chemistry**, ano 2023, v. 410, p. 135405, 5 jan. 2023.

LONG, H. *et al.* Preparation of chitosan/ fennel seed essential oil/ starch sodium octenyl succinate composite films for apple fruit preservation. **LWT - Food Science and Technology**, ano 2022, v. 167, p. 113826, 15 jul. 2022.

LU, W. *et al.* Development of antioxidant and antimicrobial bioactive films based on Oregano essential oil/mesoporous nano-silica/sodium alginate. **Food Packaging and Shelf Life**, [S. l.], ano 2021, v. 29, p. 100691, 27 maio 2021.

MAHANTA, B. P. *et al.* Thermolabile essential oils, aromas and flavours: Degradation pathways, effect of thermal processing and alteration of sensory quality. **Food Research International**, [S. l.], ano 2021, v. 145, p. 110404, 11 maio 2021.

MAHCENE, Z. *et al.* Development and characterization of sodium alginate based active edible films incorporated with essential oils of some medicinal plants. **International Journal of**

Biological Macromolecules, [S. l.], ano 2020, v. 145, p. 124-132, 15 fev. 2020.

MATHUKMI, K.; SARKAR, A.; SURESH, C. P. Physicochemical characteristics of different banana genotypes in Nagaland. **International Journal of Plant & Soil Science**, p. 882-889, 2022.

MENDES, A. C.; PEDERSEN, G. A. Perspectives on sustainable food packaging:– is bio-based plastics a solution?. **Trends in Food Science & Technology**, [S. l.], ano 2021, v. 112, p. 839-846, 13 abr. 2021.

MENEZES, F. L. G. *et al.* TiO₂-enhanced chitosan/cassava starch biofilms for sustainable food packaging. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, [S. l.], ano 2021, v. 630, p. 127661, 1 out. 2021.

MENEZES, F. L. G. *et al.* TiO₂ incorporated into a blend of biopolymeric matrices improves film properties and affects the postharvest conservation of papaya fruits under UV light. **Food Chemistry**, v. 7, p. 137387, 2023.

METHA, C.; PAWAR, S.; SUVARNA, V. Recent advancements in alginate-based films for active food packaging applications. **Sustainable Food Technology**, [S. l.], v. 2, n. 5, p. 1246-1265, 19 set. 2024.

MIRANDA, C. G. *et al.* Evaluation of cassava leaves extract as a material to produce biopolymer-based films. **Food Hydrocolloids**, ano 2023, v. 144, p. 108944, 4 jun. 2023.

MISHRA, P.; SOHRAB, S.; MISHRA, S. K. A review on the phytochemical and pharmacological properties of *Hyptis suaveolens* (L.) Poit. **Future Journal of Pharmaceutical Sciences**, [S. l.], ano 2021, v. 7, n. 65, p. 1-12, 12 mar. 2021.

MOHAMED, S. A. A. *et al.* Polysaccharides, Protein and Lipid -Based Natural Edible Films in Food Packaging: A Review. **Carbohydrate Polymers**, [S. l.], ano 2020, v. 238, p. 116178, 15 jun. 2020.

MOOLA, A K. *et al.* Chemical composition and larvicidal activity against *Aedes aegypti* larvae from *Hyptis suaveolens* (L.) Poit essential oil. **Journal of Natural Pesticide Research**, ano 2023, v. 3, p. 100018, 12 mar. 2023.

MORENO, M. I.; SÁNCHEZ, J. A. R.; SANTOYO, M. C.. An Extensive Review of Natural Polymers Used as Coatings for Postharvest Shelf-Life Extension:: Trends and Challenges. **Polymers**, [S. l.], ano 2021, v. 13, p. 3271, 25 set. 2021.

MOSHOOD, T. D. *et al.* Green product innovation: A means towards achieving global sustainable product within biodegradable plastic industry. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 363, p. 132506, 20 ago. 2022.

MOTELICA, L. *et al.* Biodegradable Antimicrobial Food Packaging: Trends and Perspectives. **Foods**, [S. l.], ano 2020, v. 9, n. 10, p. 1438, 12 out. 2020.

MURMU, S. B.; MISHRA, H. Ni. Post-harvest shelf-life of banana and guava: Mechanisms of common degradation problems and emerging counteracting strategies. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, [S. l.], ano 2018, v. 49, p. 20-30, 20 jul. 2018.

NANTITANON, W.; CHOWWANAPHOONPOHN, Sombat; OKONOGI, Siriporn. Antioxidant and Antimicrobial Activities of *Hyptis suaveolens* Essential Oil. **Scientia Pharmaceutica**, [S. l.], ano 2007, v. 75, n. 1, p. 35-46, 2 mar. 2007.

NEHCHIRI, N.; AMIRI, S.; RADI, M. Improving the water barrier properties of alginate packaging films by submicron coating with drying linseed oil. **Packaging Technology and Science**, [S. l.], ano 2021, v. 34, p. 283-295, 3 fev. 2021.

NÓBREGA, J. S. *et al.* Ecophysiology of *Mesosphaerum suaveolens* (L.) (Lamiaceae) under saline stress and salicylic acid. **Ciência Rural**, [S. l.], ano 2022, v. 52, n. 9, p. e20210389, 15 abr. 2022.

OLIVEIRA, V.R.L. *et al.* Use of biopolymeric coating hydrophobized with beeswax in post-harvest conservation of guavas. **Food Chemistry**, [S. l.], ano 2018, v. 259, p. 55-64, 23 mar.

2018.

PAIVA, C. A. *et al.* Extended shelf life of melons using chitosan and graphene oxide-based biodegradable bags. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 44, p. 1-12, 2020.

PAIVA, C. A. *et al.* Performance of Galia? melon grown under different soil cation ratios. **Semina-Ciencias Agrarias**, v. 42, p. 3089-3106, 2021.

PBMH. Programa Brasileiro para a Modernização da Horticultura e Produção Integrada de Frutas. **Normas de Classificação de Banana**. São Paulo: CEAGESP, 2006 (Documentos, 29); 7 p.

PENICHE, T. *et al.* Larvicidal Effect of Hyptis suaveolens (L.) Poit. Essential Oil Nanoemulsion on Culex quinquefasciatus (Diptera: Culicidae). **Molecules**, [S. l.], ano 2022, v. 27, n. 23, p. 8433, 2 dez. 2022.

PHAM, B. T. *et al.* Pectin/agarose-based coating functionalized with Piper betel L. extract for enhancing storability of postharvest bananas. **Progress in Organic Coatings**, [S. l.], ano 2023, v. 185, p. 107916, 1 set. 2023.

POKHREL, B; CHODEN, D. Antifungal efficacy of Hyptis suaveolens and Rumex nepalensis extracts against Alternaria solani: An approach for bio-pesticides. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, ano 2022, v. 43, p. 402439, 22 jul. 2022.

POONKODI, K. *et al.* Chemical composition of essential oil of Hyptis suaveolens (L.) POIT and its invitro anticancer activity. **Journal of Pharmacy Research**, [S. l.], v. 11, n. 5, p. 410-413, 12 maio 2017.

PORTA, R.; SABBAH, M.; DI PIERRO, P. Biopolymers as Food Packaging Materials. **International Journal of Molecular Sciences**. 2020, 21, 4942.

QAMAR, S.; SHAIKH, A. Therapeutic potentials and compositional changes of valuable compounds from banana: A review. **Trends in Food Science & Technology**, [S. l.], ano 2018,

v. 79, p. 1-9, 30 jun. 2018.

QIN, Z. *et al.* Food packaging for ripening and preserving banana based on ethylene-loaded nanofiber films deposited with nanosized cyclodextrin metal-organic frameworks and TiO₂ nanoparticles. **Food Packaging and Shelf Life**, [S. l.], ano 2024, v. 45, p. 101332, 3 ago. 2024.

QUEIROZ, L. P. O.; AROUCHA, E. M. M.; LEITE, R. H. L. Optimization of novel sustainable Dictyota mertensii alginate films with beeswax using a simplex centroid mixture design. **Food Hydrocolloids**, [S. l.], ano 2025, v. 160, p. 110782, 24 out. 2024.

QUEIROZ, L. P. O. *et al.* A novel edible biocomposite coating based on alginate from the brown seaweed Dictyota mertensii loaded with beeswax nanoparticles extends the shelf life of yellow passion fruit. **International Journal of Biological Macromolecules**, [S. l.], ano 2025, v. 284, p. 138051, 27 nov. 2024.

RANJHA, M. M. A. N.; IRFAN, S.; NADEEN, M.; MAHMOOD, S. A comprehensive review on nutritional value, medicinal uses, and processing of banana. **Food Reviews International**, v. 38, n. 2, p. 199-225, 2022.

REN, Y. *et al.* Degradation of cell wall polysaccharides and change of related enzyme activities with fruit softening in Annona squamosa during storage. **Postharvest Biology and Technology**, [S. l.], ano 2020, v. 166, p. 111203, 30 abr. 2020.

RODRIGUES, A. A. M. *et al.* Properties and characterization of biodegradable films obtained from different starch sources. **Food Science and Technology**, Campinas, ano 2021, v. 41, p. 476-482, 1 fev. 2021.

RODRIGUES, F. A. M. *et al.* Antioxidant films and coatings based on starch and phenolics from Spondias purpurea L. **International Journal of Biological Macromolecules**, [S. l.], ano 2021, v. 182, p. 364-365, 6 jan. 2021.

SANTHOSH, R. *et al.* Active bio-nanocomposites from litchi seed starch, tamarind kernel xyloglucan, and lignin nanoparticles to improve the shelf-life of banana (Musa

acuminata). **Food Chemistry**, [S. l.], ano 2025, v. 463, p. 141327, 15 jan. 2025.

SAURABH, C. K.; GUPTA, S.; VARIYAR, P.; SHARMA, A. Effect of addition of nanoclay, beeswax, tween-80 and glycerol on physicochemical properties of guar gum films. **Industrial Crops and Products**, v. 89, p.109-118, 2016.

SAURABH, C. K.; GUPTA, S.; VARIYAR, P.; SHARMA, A. Effect of addition of SAVAGE, G.; PORTER, A.; SIMPSON, S. D. Uptake of microplastics by the snakelocks anemone (*Anemonia viridis*) is commonplace across environmental conditions. **Science of The Total Environment**, v. 836, 25 ago. 2022.

SHAFQAT, A. *et al.* Synthesis and characterization of starch based bioplastics using varying plant-based ingredients, plasticizers and natural fillers. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 28, n. 3, p. 1739–1749, mar. 2021.

SHARMA, S. *et al.* Essential oils as additives in active food packaging. **Food Chemistry**, v. 343, p. 128403, 1 maio 2021.

SHI, Shuo *et al.* Beeswax coating improves the hydrophobicity of sodium alginate/ anthocyanin/ cellulose nanocrystal indicator film. **Food Hydrocolloids**, [S. l.], ano 2024, v. 144, p. 108930, 11 jun. 2023.

SHIVANGI, S. *et al.* Development and characterisation of a pectin-based edible film that contains mulberry leaf extract and its bio-active components. **Food Hydrocolloids**, [S. l.], ano 2021, v. 121, p. 107046, 19 jul. 2021.

SILVA, W. A. O. *et al.* The Shelf Life of Yellow Passion Fruit with an Edible Biocomposite Coating Based on Chitosan, Graphene Oxide Nanoparticles, and Beeswax. **Horticulturae**, v. 10, p. 756-xxx, 2024.

SORADECH, S.; NUNTHANID, J.; LIMMATVAPIRAT, S.; LUANGTANA-ANAN, M. Utilization of shellac and gelatin composite film for coating to extend the shelf life of banana. **Food Control**, v. 73, p.1310-1317, 2017.

SUHAG, R. *et al.* Film formation and deposition methods of edible coating on food products: A review. **Food Research International**, [S. l.], ano 2020, v. 136, p. 109582, 30 jul. 2020.

TACO. Tabela Brasileira de Composição de Alimentos – TACO. 4ª Edição. Campinas - SP, 2011.

TANPICHAI, S.; THONGDONSON, K.; BOONMAHITTHISUD, A. Enhancement of the mechanical properties and water barrier properties of thermoplastic starch nanocomposite films by chitin nanofibers: Biodegradable coating for extending banana shelf life. **Journal of Materials Research and Technology**, [S. l.], ano 2023, v. 26, p. 5617-5625, 28 ago. 2023.

TEHAVUTHIPORN, C. *et al.* A coating made from carboxymethyl cellulose derived from commercial nata de coco reduces postharvest changes in ‘Hom Thong’ banana fruit during ambient storage. **Postharvest Biology and Technology**, [S. l.], ano 2024, v. 208, p. 112650, 16 fev. 2024.

TEDESCHI, G. *et al.* Sustainable fabrication of plant cuticle-like packaging films from tomato pomace agro-waste, beeswax, and alginate ACS **Sustainable Chemistry & Engineering**. Ano 2018, v. 6, n. 11, pp. 14955-14966, 2018.

TONG, Q.; XIAO, Q.; LIM, L.-T. Effects of glycerol, sorbitol, xylitol and fructose plasticisers on mechanical and moisture barrier properties of pullulan-alginate - carboxymethylcellulose blend films. **Int. J. Food Sci. Technol**, ano 2013, v. 48, p. 870–878, 03 dec. 2012.

TRIPATHI , A.K.; UPADHYAY, Shikha. Repellent and insecticidal activities of *Hyptis suaveolens* (Lamiaceae) leaf essential oil against four stored-grain coleopteran pests. **International Journal of Tropical Insect Science**, [S. l.], v. 29, n. 4, p. 219-228, 19 dez. 2009.

URSACHI, V.-F. *et al.* Development and characterization of biodegradable films based on cellulose derivatives and citrus pectin: A comparative study. **Industrial Crops and Products**, [S. l.], ano 2024, v. 219, p. 119052, 1 nov. 2024.

VASILE, C.; BAICAN, M. Progresses in Food Packaging, Food Quality, and Safety: Controlled-Release Antioxidant and/or Antimicrobial Packaging. **Molecules**, v. 26, n. 5, 26 fev. 2021.

VERGARA, L. D. *et al.* Development and characterization of edible films based on native cassava starch, beeswax, and propolis. **NFS Journal**, [S. l.], ano 2020, v. 21, p. 39-49, 23 jul. 2020.

VIANNA, T. C. *et al.* Essential oils as additives in active starch-based food packaging films: A review. **International Journal of Biological Macromolecules**, [S. l.], ano 2021, v. 182, p. 1803-1819, 28 maio 2021.

VILVERT, J. C. *et al.* Chitosan and graphene oxide-based biodegradable bags: An eco-friendly and effective packaging alternative to maintain postharvest quality of -Palmer? mango. **LWT-Food Science and Technology**, v. 154, p. 112741, 2022.

WAN, H.; ZHU, Z.; SUN, D.-W. Deep eutectic solvents (DESs) films based on gelatin as active packaging for moisture regulation in fruit preservation. **Food Chemistry**, [S. l.], ano 2024, v. 439, p. 138114, 29 nov. 2023.

WANG, C. *et al.* Characterization of sodium alginate-carrageenan films prepared by adding peanut shell flavonoids as an antioxidant: Application in chilled pork preservation. **International Journal of Biological Macromolecules**, [S. l.], ano 2024, v. 266, p. 131081, 27 mar. 2024.

WARDAK, M. H. *et al.* Preparation and characterization of corn starch-based film: effect of citric acid or sunflower oil and its combination. **Journal of Food Measurement and Characterization**, [S. l.], ano 2021, v. 15, p. 1907-1915, 4 jan. 2021.

WARDAK, M. H. *et al.* Development of a coating material composed of sodium alginate and kiwifruit seed essential oil to enhance persimmon fruit quality using a novel partial coating technique. **Food Packaging and Shelf Life**, [S. l.], ano 2024, v. 45, p. 101331, 5 ago. 2024.

OLIVEIRA, V. R. L.E. *et al.* Evaluation of Biopolimeric Films of Cassava Starch with Incorporation of Clay Modified by Ionic Exchange and its Application as a Coating in a Fruit. **Materials Research**, v. 9, p. 1-9, 2018.

XIAO, X.-m. *et al.* Banana ERF transcription factor MaERF110 is involved in ethylene-induced chilling tolerance by regulating ROS accumulation. **Postharvest Biology and Technology**, [S. l.], ano 2023, v. 197, p. 112218, 8 dez. 2022.

XIE, J. *et al.* A novel Ag₂O-TiO₂-Bi₂WO₆/polyvinyl alcohol composite film with ethylene photocatalytic degradation performance towards banana preservation. **Food Chemistry**, [S. l.], ano 2022, v. 375, p. 131708, 2 dez. 2021.

XUE, S.; HUANG , Q. Preparation of Novel Flaxseed Oil/Beeswax Oleogel Systems and Its Application in the Improvement of Sodium Alginate Films. **Gels**, [S. l.], ano 2024, v. 10, n. 1, p. 78, 21 jan. 2024.

XUE, S.; HUANG, Q. Preparation of Novel Flaxseed Oil/Beeswax Oleogel Systems and Its Application in the Improvement of Sodium Alginate Films. **Gels**, [S. l.], ano 2024, v. 10, n. 1, p. 78, 21 jan. 2024.

YAN, X. *et al.* Improvement of cross-linked films based on chitosan/diepoxy-poly (ethylene glycol) incorporating trans-cinnamaldehyde essential oil: Preparation, properties, and application in banana storage. **International Journal of Biological Macromolecules**, [S. l.], ano 2024, v. 263, p. 130299, 20 fev. 2024.

YERMAGAMBETOVA, A.D. Effect of plasticizers on the rheological properties of xanthan gum - starch biodegradable films. **Heliyon**, [S. l.], ano 2024, v. 10, p. e34550, 12 jul. 2024.

YOUSSEF, K.; ROBERTO, S. R. Chitosan/silica nanocomposite-based formulation alleviated gray mold through stimulation of the antioxidant system in table grapes. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 168, p. 242–250.

YU, K. *et al.* Strong, tough self-healing multi-functional sodium alginate-based edible

composite coating for banana preservation. **International Journal of Biological Macromolecules**, [S. l.], v. 281, p. 136191, 2 out. 2024.

ZHANG, M.; CHEN, H. Development and characterization of starch-sodium alginate-montmorillonite biodegradable antibacterial films. **International Journal of Biological Macromolecules**, [S. l.], ano 2023, v. 223, p. 123462, 28 jan. 2023.

ZHANG, X.; FAN, X.; LI, W. Effect of emulsified lipid and saponified lipid on the enzyme desizing of starch and its mechanism. **International Journal of Biological Macromolecules**, [S. l.], ano 2024, v. 268, p. 131835, 23 abr. 2024.

ZHANG, Y.; SIMPSON, B. K.; DUMONT, M.-J. Effect of beeswax and carnauba wax addition on properties of gelatin films: A comparative study. **Food Bioscience**, [S. l.], ano 2018, v. 26, p. 88-95, 16 out. 2018.

ZHANG, Y. *et al.* Improved sustained-release properties of ginger essential oil in a Pickering emulsion system incorporated in sodium alginate film and delayed postharvest senescence of mango fruits. **Food Chemistry**, [S. l.], ano 2024, v. 435, p. 137534, 22 set. 2023.

ZHAO, S. *et al.* Characterization of Nanoemulsions Stabilized with Different Emulsifiers and Their Encapsulation Efficiency for Oregano Essential Oil: Tween 80, Soybean Protein Isolate, Tea Saponin, and Soy Lecithin. **Foods**, [S. l.], ano 2023, v. 12, p. 3183, 24 ago. 2023.

ANEXOS

Anexo A. quadro de análise sensorial para as bananas.

QUADRO DE ANÁLISE SENSORIAL			
Nome: _____ Sexo: M () F () Faixa etária: () 18-25 anos () 26-35 anos () acima de 36 anos.			
Prezado (a) este instrumento é parte de uma pesquisa desenvolvida no Programa de Pós-graduação em Ambiente Tecnologia e Sociedade da UFERSA. Trata-se de uma avaliação qualitativa denominada de “análise sensorial”. Você está recebendo uma amostra contendo quatro (5) frutos dos tratamentos codificados utilizando três dígitos distintos. Sua participação é relevante, logo avalie atentamente utilizando os parâmetros conforme o quadro avaliativo.			
Amostra	Aceitação (1-4)	Ocorrência de fungo (1-4)	Adesividade do Filme (1-4)
49			
14			
31			
65			
23			
Aceitação = 1) Excelente (fresco); 2) Bom (desidratação leve, aparentemente fresco comerciável; 3) Aceitável (desidratação moderada. Comerciável); 4) Inaceitável (desidratação grave, enrugado, mofo).			
Ocorrência de fungo = 1) Excelente (ausência de fungo); 2) Bom (fungo leve afetando pequenas áreas do fruto); 3) Aceitável (fungo moderado afetando até duas áreas diferentes do fruto); 4) Inaceitável (fungo severo afetando mais de 50% do fruto)			
Adesividade do filme = 1) Excelente (sem descamação); 2) Bom (leve descamação); 3) Aceitável (com descamação afetando pequenas áreas do fruto); 4) Inaceitável (com descamação intensa afetando mais 50% do fruto).			